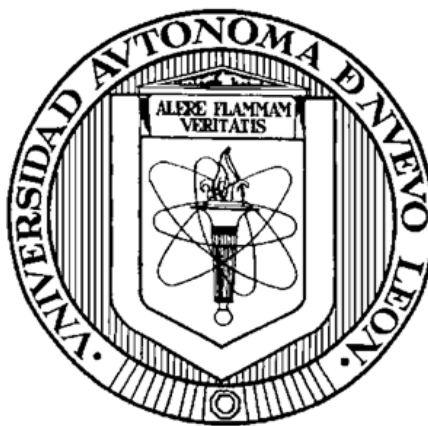


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL
PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS
EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**

PRESENTA
M.C. NELLY LUCERO RAMÍREZ SERRATO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

JUNIO, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA
CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA
METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**

**PRESENTA
M.C. NELLY LUCERO RAMÍREZ SERRATO**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**DIRECTOR DE TESIS
DRA. FABIOLA DORACELY YÉPEZ RINCÓN**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

JUNIO, 2019

Diseño y validación de modelos de predicción espacial para cartografiar susceptibilidad por deslizamientos en la Zona Metropolitana de Monterrey, N.L. México.

Aprobación de la tesis

Director de Tesis

Co-director de Tesis

Sinodal

Sinodal

Sinodal

Sinodal

Sub-Director de Estudios de Posgrado



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOMÁTICA

Dr. Cesar Juárez Alvarado
Subdirección de posgrado
Facultad de Ingeniería Civil

Estimado Dr. Juárez:

Por este conducto quisiera hacer de su conocimiento, que he revisado el documento de tesis doctoral de la alumna Nelly Lucero Ramírez Serrato, y en mi consideración se encuentra listo para que se someta a la revisión final por parte del comité evaluador.

Dicho comité se conforma por cuatro especialistas que cuentan con la experiencia para darle respaldo técnico y emitir sugerencias para el enriquecimiento del documento. Los miembros son:

Directora: Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón

Codirector: Dr. Adrián Leonardo Ferriño Fierro

Sinodal interno: Dr. Víctor Hugo Guerra Cobián

Sinodal interno: Dr. Juan Manuel Rodríguez Martínez

Sinodal externo: Dra. Cristina Noyola Medrano, profesora de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Tel: +52 444 8262300 ext 21 cristina.noyola@uaslp.mx

La estudiante, ha cumplido cabalmente con los créditos requeridos (Anexo 1), así como con el requisito mínimo de publicar resultados en una revista enlistada en el Journal Citation Index, en su caso Geocarto International que se encuentra en el Q2 (Anexo 2). Considerando de suma importancia que la Subdirección de Posgrado a través de su persona pueda realizar las cartas oficiales que se requieren para dar seguimiento al proceso, esperamos que en los próximos días podamos contar con su apoyo para hacerle llegar la notificación al comité y que la estudiante pueda culminar su proceso en tiempo y forma.

Quedando a sus órdenes para cualquier duda o aclaración, le envió un saludo cordial.

Atentamente,
ALERE FLAMMAM VERITATIS
Cd. Universitaria a, 31 de mayo de 2019


Dra. Fabiola D. Yépez Rincón
Jefa del Departamento de Geomática

c.p.p. Dr. Víctor H. Guerra Cobián – Coordinador Doctorado



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels: (81) 8329-4000 ext. 7282
www.ingenieriacivil.uanl.mx
fabiola.yepzrn@uanl.edu.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis con título **“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**, que presenta el **M.C. Nelly Lucero Ramírez Serrato**, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 30 de agosto de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”
Cd. Universitaria, agosto de 2019


DRA. FABIOLA DORACELY YÉPEZ RINCÓN
Evaluador



*“Educación de clase mundial,
un compromiso social”*

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66465
Tel: 1442 4400 Fax: 1442 4443
<http://www.fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis con título **“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**, que presenta el **M.C. Nelly Lucero Ramírez Serrato**, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 30 de agosto de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

“Alere Flammam Veritatis”

Cd. Universitaria, 19 de Junio de 2019

DR. ADRIÁN LEONARDO FERRIÑO FIERRO

Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
Subdirector de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil de la UANL

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la Tesis con título **“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**, que presenta el **M.C. Nelly Lucero Ramírez Serrato**, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 30 de agosto de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”
Cd. Universitaria, 24 de junio de 2019

DR. VICTOR HUGO GUERRA COBIÁN
Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis con título **“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**, que presenta el **M.C. Nelly Lucero Ramírez Serrato**, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 30 de agosto de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

“Alere Flammam Veritatis”

Cd. Universitaria, 19 de Junio de 2019



DR. JUAN MANUEL RODRIGUEZ MARTINEZ

Evaluador

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UANL
DR. CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalice la revisión de la Tesis con título **“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO”**, que presenta la **M.C. Nelly Lucero Ramírez Serrato**, como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 30 de agosto de 2019.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”
Cd. Universitaria, 11 de julio de 2019



DRA. CRISTINA NOYOLA MEDRANO
Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: NELLY LUCERO RAMÍREZ SERRATO

Tema de la tesis: Diseño y validación de modelos de predicción espacial para cartografiar susceptibilidad por destizamientos en la Zona Metropolitana de Monterrey, N.L. México.

Este documento certifica la corrección definitiva
Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(Ninguna)

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
Subdirector de Estudios de Posgrado

Ciudad Universitaria, a 12 de agosto de 2019.

Dedicatoria

A mis padres, Adela Serrato y Salvador Ramírez, Mis hermanas Lili, Adely y Marly, mis sobrinitos, Carlitos, Renata, Lucero, Julián y Marquitos, y al nuevo integrante de la familia Arturo Moyado. Una vez más demostramos que la unión hace la fuerza, muchas gracias por demostrarme el valor del trabajo en equipo, de la unidad familiar,. ¡Superación es progreso!

Esta tesis también está dedicada a todas las personas que me ayudaron a formarme en esta especialidad nombrada recientemente como Geomática, que no es más que la integración de los Sistemas de Información Geográfica y la percepción remota, a todas esas personas que luchan en el día a día por ser reconocidos, y que en la búsqueda de ser mejores, se dieron un espacio para la formación de nuevos elementos. Iniciando por el Maestro Alejandro Hinojosa del CICESE, Baja California, seguido por la Maestra Patricia Vela y el Dr. Lozano del ITESM, campus Monterrey, y finalmente, por quien me motivo a llevar el conocimiento a una nueva etapa de desarrollo, fungiendo como asesora y amiga, la Dra. Fabiola Yépez Rincón.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Adrian Leonardo Ferriño Fierro, Dr. Victor Hugo Guerra Cobian, Dr. Juan Manuel Rodriguez, y a mis asesoras externas la Dra. Cristina Noyola y la Dra. Judith Ley, quien finalmente no pudo formar parte del comité final pero que brindó su apoyo durante las primeras fases de este proyecto. Les agradezco mucho su interés, sus palabras de apoyo, su comprensión pero más que nada les agradezco la paciencia por esperar a ver un proyecto finalmente terminado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de mis estudios. Sin esta aportación habría sido casi imposible concluir con mis estudios de posgrado.

A mi asesora, la Dra. Fabiola Yépez Rincón, mi couch de vida personal, que me ha incentivado a iniciar esta nueva etapa, a aventurarme a lo desconocido y seguir creciendo, por ser un ejemplo de vida que me motivó a seguir sus pasos. Gracias por creer y confiar en que podría lograrlo, ojala todos pudieran tener este vínculo personal y profesional con su asesor.

Al Instituto de Ingeniería Civil por permitirme el uso de su equipo y su invaluable ayuda en el desarrollo de este estudio. Especialmente al recientemente creado (2019) Departamento de Geomatica, reconociendo el apoyo de todos los individuos que forman parte de esta unión, “porque solo uno nunca basta”: Juan José Aguilar, Yris Laura, Andrea Escobedo, Alejandro Barrón, Roberto Huerta y la nueva integrante Diana.

A mis amigos y compañeros de tragedias escolares: Sergio, Felipe e Isabel, con quien pude desahogarme y quienes pudieron desahogarse, en cada uno de los pasos dedicados concluir la odisea técnico-teórica-burocrática de realizar un doctorado.

A mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado siempre, somos un equipo y siempre lo vamos a ser, a pesar de la distancia.

A Arturo Moyado, por sus cuidados y atenciones, por ser un alma libre que me ha ayudado en la búsqueda del control del estrés, las ansias y la desesperación, enserio te agradezco.

A mis amigos fuera del ámbito académico, principalmente a Rogelio Padilla por su apoyo constante, incondicional, siempre atento, amable y buscando como apoyar, espero que nunca cambies y encuentres tu camino para la vida. A mis amigos, Nallely Flores, Abraham Gonzalez, Andrés, Andrea Pacheco, Karol Valeria, Minerva Padilla, Victor Huerta, Perla Ledezma, Nestor Lopez, Diego Cerditos, Armando Calderon por su apoyo y comprensión y especialmente a Federico Treviño por su constante atención.

Índice

1	Introducción	1
1.1.1	Expansión poblacional y su problemática	1
1.1.2	Antecedentes de la Modelación SIG	3
1.1.3	Clasificación de imágenes	10
1.2	Propuesta de investigación	14
1.2.1	Justificación	14
1.2.2	Hipótesis	15
1.2.3	Objetivo general	15
1.2.4	Objetivos específicos.....	15
2	Marco teórico	16
2.1	Área de estudio	16
2.2	Características del medio natural	18
2.2.1	Marco tectónico y geológico	18
2.2.2	Sismicidad	24
2.2.3	Clima	25
2.2.4	Relieve.....	28
2.2.5	Uso de suelo y vegetación	31
2.2.6	Inventario de deslizamientos.....	35
3	Metodología.....	37
3.1	Insumos	39
3.2	Modelo SIG	40
3.2.1	A. Factores Topográficos.....	41
3.2.2	B. Factores Geológicos	47
3.2.3	C. Factores Ambientales	52
3.2.4	D. Factores Antrópicos.....	56
3.3	Detección de posibles deslizamientos históricos.	71
3.4	Trabajo de campo	78
3.4.1	Validación de geometría	82

3.4.2	Procesamiento del trabajo de campo	87
4	Resultados	102
4.1	Modelo SIG	102
4.2	Inventario de deslizamientos	107
4.3	Trabajo de campo	114
5	Conclusiones	117
5.1	Modelo SIG	117
5.2	Inventario de deslizamientos	117
5.3	Trabajo de campo	118
6	Bibliografía	119
7	Anexos	134

Lista de tablas

Tabla 1. Datos de superficie en comparación con la cantidad de población en un intervalo de tiempo determinado (1990-2010) para las ZMM y ZMVMZona Metropolitana de Valle de México, tomado de (CONAPO I. S., 2010).	2
Tabla 2. Crecimiento urbano para la ZMM (Desarrollo Urbano, 2017).	2
Tabla 3. Tabla de relación entre el tamaño de los deslizamientos que pueden mapearse con respecto a los insumos utilizados. Modificada de (Mantovani, Soeters, & Van Westen, 1996; Wang Z. , 2004; Zhang, Gong, Zhao, & Zhang, 2005).	12
Tabla 4. Comparación de cobertura espectral, modificada de (Stumpf, Holderied, & Sinclair, 2003; Zhu, Wang, & Woodcock, 2015).	13
Tabla 5. Porcentajes de cobertura por tipo de roca. Cálculo hecho sobre datos de INEGI para el polígono de estudio.	18
Tabla 6. Cobertura (en km ²) de los diferentes tipos de clima presentes en el área de estudio con base datos de INEGI.	26
Tabla 7. Información de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 (tomado de INEGI, 2015).	31
Tabla 8. Descripción y coberturas de tipos de uso de suelo para el área de influencia correspondientes a la capa de Uso de Suelo y Vegetación serie V de INEGI, calculado para el presente estudio.	33
Tabla 9. Insumos utilizados para el presente proyecto.	39
Tabla 10. Clasificación de orientación de las laderas por el método de de Burrough & McDonell (1998).	42
Tabla 11. Reclasificación de factores topográficos.	43
Tabla 12. Reclasificación de categorías de morfología por la técnica de Jennes, para usar dentro del Modelo SIG (Jenness, 2006).	45
Tabla 13. Factores geológicos, ángulos diferenciales de rumbos y buzamientos entre el corte de la ladera y las capas litológicas que la componen.	49
Tabla 14. Reclasificación del factor edafológico, con base en el mapa edafológico proporcionado por INEGI, escala 1:50,000.	52
Tabla 15. Cálculo de coberturas sobre información de INEGI, sobre el polígono utilizado para el presente proyecto.	61
Tabla 16. Reclasificación de uso de suelo, Modificado (De Tamaulipas, 2009).	61
Tabla 17. Estadísticas de precisión de clasificación de imagen.	63
Tabla 18. Equipo y dispositivos utilizados para el trabajo de campo.	78
Tabla 19. Cantidad de puntos obtenidos con fotogrametría, cantidad de puntos que correspondían a la categoría de suelo, utilizados para generar los MDE y el porcentaje de puntos que fue filtrado durante el procedimiento.	88

Tabla 20. Resultados de cobertura por nivel de zonificación (Área en Km ²).	104
Tabla 21 Caracterización manual, con extensión de cobertura (en m2), el año de la imagen en la que se visualizó el deslizamiento y la evidencia con la cual se reconoció el polígono.	110
Tabla 22. Resultados estadísticos de coberturas para la Región 1 y la Región 2, para el método TCM, CCM y tradicional (manual).....	111
Tabla 23. Porcentaje de cobertura de traslape entre los métodos automatizados y el método manual, y la comparación entre ambos modelos para las dos regiones.	112
Tabla 24. Porcentaje de traslape del modelo SIG con respecto a los sitios de probable ocurrencia de deslizamientos en masa.....	113

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de inestabilidad de laderas. Adaptado de (Alcántara Ayala & Murillo García, 2008; Terzaghi, 1950; Highland & Bobrowsky, 2008; Cruden & Varnes, 1996; González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).	4
Figura 2. Diagrama de niveles de análisis para la elaboración de Atlas de Riesgos. Basado en (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).	7
Figura 3. Cobertura de uso de suelo, INEGI 1:250,000, serie V. Modificado de INEGI (véase simbología en Anexo 1).	11
Figura 4. Deslizamiento registrado en el Cerro de la Corona, perteneciente al Municipio de San Pedro, Garza García (Rodriguez, Valero, Navarro, & Bermúdez., consultado en 2018).	16
Figura 5. Mapa de ubicación del sitio de estudio.	17
Figura 6. Mapa litológico del área de estudio basado en datos de INEGI (1:50,000/1:250,000).	19
Figura 7. Tabla estratigráfica del NE de México de Michalzik (1988) posteriormente modificada por Chávez Cabello (2016).	23
Figura 8. A) Regionalización sísmica de México (Gutierrez, y otros, 1990), b) Mapa de sismicidad Anual de 2017 (tomado del Servicio Sismológico Nacional SNN, revisado en 2018).	24
Figura 9. Estación meteorológica “La Huastequita”, gráfico tomado de la plataforma CLICOM.	25
Figura 10. Mapa con los diferentes tipos de clima presentes en la zona de estudio con datos de INEGI.	27
Figura 11. Mapa de relieve de INEGI, la estrella amarilla es el punto de localización del área de estudio.	28
Figura 12. Mapa de provincias fisiográficas con datos de INEGI (Elaboración propia).	29
Figura 13. Mapa de subprovincias fisiográficas con datos de INEGI (Ramírez, 2019).	30
Figura 14. Uso de suelo y vegetación para el área de estudio con datos de INEGI, Uso de Suelo y Vegetación serie V.	34
Figura 15. Diagrama de flujo general del proyecto.	38
Figura 16. Dirección acimutal de orientación, considerando que el valor 0 apunta al norte geográfico de la Tierra. Tomado de Burrough & McDonell (1998).	42
Figura 17. Re-categorización de la información con respecto a la metodología planteada, insumo CEM-INEGI de 5m.	43
Figura 18. Re-categorización de la información con respecto a la metodología planteada, insumo MDE-LIDAR de 1m.	44

Figura 19. Representación de la clasificación de paisaje por la técnica de Jennes, TPI (Jenness, 2006).	45
Figura 20. Mapa morfológico reclasificado, basado en CEM-INEGI de 5m.	46
Figura 21. Mapa morfológico reclasificado, basado en MDE-LIDAR de 1m.	46
Figura 22. Mapa de reclasificación litológica para ser integrada dentro del modelo, con base en mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.	48
Figura 23. Mapa de reclasificación a partir de un análisis de densidad de fracturas para ser integrada dentro del modelo, con base en mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.	48
Figura 24. Mapa diferencial de buzamiento, con base en CEM-INEGI de 5 m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.	49
Figura 25. Mapa diferencial de rumbos con base en CEM-INEGI de 5 m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.	50
Figura 26. Mapa diferencial de buzamientos con base en MDE-LIDAR de 1m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.	50
Figura 27. Mapa diferencial de rumbos con base en MDE-LIDAR de 1m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.	51
Figura 28. Mapa edafológico reclasificado, con base en el mapa edafológico proporcionado por INEGI, escala 1:50,000.....	52
Figura 29. Reclasificación de arroyos con base en información del SIATL utilizado para el modelo de escala 1:250:000.....	53
Figura 30. Diagrama de flujo para la generación de arroyos sobre modelo de elevación de 1m (Elaboración propia).	55
Figura 31. Reclasificación de escurrimientos superficiales obtenidos con base en MDE-LIDAR de 1m.	55
Figura 32. Mapa de ubicación del área de estudio con los sitios utilizados para entrenamiento y validación.	56
Figura 33. Técnicas implementadas en el presente proyecto para clasificar la imagen satelital. NDVI, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, MLC, Clasificación de Máxima Similitud, GMM, Modelo de mezclas gaussianas y Clasificación por agrupación no supervisada.	57
Figura 34. Diagrama de flujo general para clasificación de imágenes.	58
Figura 35. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 1.	64
Figura 36. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 2.	65
Figura 37. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 3.	66
Figura 38. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 4.	67
Figura 39. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 5.	68
Figura 40. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 6.	69
Figura 41. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 7.	70

Figura 42. Diagrama de flujo, comparación de métodos automatizados para reconocimiento de sitios de deslave. Modificado de (Ramírez Serrato, Yépez-Rincón, & Ferriño Fierro, 2019).	75
Figura 43. Materiales utilizados para el estudio.	79
Figura 44 A) Ladera Chipinque formada por lutitas foliadas. B) Estructuras geológicas medidas en el talud: (líneas verdes), foliación (líneas rojas) y talud (polígono amarillo). C) Aproximación al talud (polígono amarillo), en donde se observa las distintas orientaciones del fracturamiento de la lutita. (Ramírez, 2019).	83
Figura 45. A) Reconocimiento de facetas de la ladera Chipinque en el programa CloudCompare. B) nube de puntos obtenida a partir de 42 fotografías tomadas mediante el VANT (dron) y C) Imagen real del talud expuesto. (Ramírez, 2019).	84
Figura 46 A) Estructuras geológicas medidas en campo para Ladera San Patricio, como lo son talud (polígono amarillo), estratificación (T), fracturas (líneas verdes). B) Talud de Ladera San Patricio donde se observa el constante desprendimiento de rocas del talud (polígonos azules).	85
Figura 47. Resultados obtenidos para la ladera San Patricio. Estereograma de Schmidt obtenido con el método tradicional (a) las nubes de puntos generadas por los sensores remotos b y c.	86
Figura 48. Sitios de muestreo para el trabajo de campo.	87
Figura 49. Diagrama de la metodología propuesta en este proyecto para el procesado de los datos de campo (Elaboración propia).	89
Figura 50. Reporte de procesado del sitio 1.	91
Figura 51. Reporte de procesado del sitio 2	92
Figura 52. Reporte de procesado del sitio 3.	93
Figura 53. Reporte de procesado del sitio 4	94
Figura 54. Reporte de procesado del sitio 5.	95
Figura 55. Reporte de procesado del sitio 6.	96
Figura 56. Reporte de procesado del sitio 7.	97
Figura 57. Reporte de procesado del sitio 8.	98
Figura 58. Reporte de procesado del sitio 9.	99
Figura 59. Reporte de procesado del sitio 10.	100
Figura 60. Reporte de procesado del sitio 11.	101
Figura 61. Gráfico de frecuencia de pixeles por categoría para el Modelo SIG a 5 m, clasificación por el método de Jenks, 2006.	103
Figura 62. Gráfico de frecuencia de pixeles por categoría para el Modelo SIG a 1 m, clasificación por el método de Jenks, 2006.	103
Figura 63. Resultado de modelación SIG a 1 m.	105
Figura 64. Resultado de modelación SIG a 5 m.	106

Figura 65. Ejemplos de deslizamientos dentro del área de estudio, incisos a y b corresponden a la misma zona pero a diferente fecha (2008 y 2009) en las cuales se aprecia la aparición de un montículo de derrubios; c) corresponde al mapeo realizado sobre una imagen de 2011, en donde se ubicaron las huellas de 3 eventos pre-existentes asociados a escorrentía de flujo y d) Se muestra material caído y depositado río abajo en la montaña, en una imagen de 2009, evento asociado con movimientos de tipo avalancha.	108
Figura 66. Resultados del mapeo de deslizamientos históricos mediante 3 métodos: TCM, CCM y la metodología tradicional (Ramírez Serrato, Yépez-Rincón, & Ferriño Fierro, 2019).	109
Figura 67. A) Histograma de frecuencia de las áreas de cobertura para los métodos TCM (Línea azul) y CCM (Línea roja) y B) los resultados de índice de forma del método TPCM.	111
Figura 68. Reporte de error (m) registrado por sitio entre las diferentes escalas.	115
Figura 69 Gráficos de comparación de resultados, entre la metodología tradicional de escala 5m con respecto a una escala de mediana resolución (1 m) y el error generado a una escala local (VANT, 0.1 m).	115
Figura 70. Porcentajes de cambio de cobertura de los sitios levantados con respecto al MDE de 1m.	116

Nomenclatura

CCM	Método de conexión de contornos (Contour Connection Method)
GMM	Modelo de mezclas gaussianas (Gaussian Mixture Model)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LIDAR	Detección de luz y rango (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging)
MDE	Modelo digital de elevación
MDS	Modelo digital de superficie
MLC	Clasificación de máxima similitud (Maximum Likelihood Classification)
MLCp	Clasificación probabilística de máxima similitud (Probabilistic Maximum Likelihood Classification)
SIATL	Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas
SIG	Sistema de información geográfica
SNN	Servicio Sismológico Nacional
TCM	Método topográfico de conexión (Topographic Connection Method)
VANT/dron	Vehículo aéreo no tripulado

RESUMEN

Nelly Lucero Ramírez Serrato

Fecha de graduación: Pendiente*

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Área de estudio: Ingeniería Ambiental

Título del estudio: Diseño y validación de modelos de predicción espacial para cartografiar susceptibilidad por deslizamientos en la Zona Metropolitana de Monterrey, N.L. México

Número de páginas: 159

Candidato para el grado de Doctor en Ingeniería, con Orientación en Ingeniería Ambiental

Propósito y método del estudio: En la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) se han registrado daños ocasionados por derrumbes. Como una medida preventiva, se ha zonificado el terreno a escala regional y dependiendo de la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno. Sin embargo, los casos reportados indican que el tipo de deslizamientos ocurridos son muy puntuales, en las montañas y lomeríos que rodean la ZMM que además de presentar características topográficas, geológicas y ambientales que potencian el problema, sufre una constante presión por el desarrollo, requiriéndose datos actualizados y una escala más fina de información que permitan modelar la susceptibilidad de este fenómeno. Las mejoras tecnológicas de sensores remotos como LIDAR (*Light Detection and Ranging*) y fotogrametría aérea con VANT (vehículos aéreos no tripulados), permiten obtener datos actuales y de mayor detalle. Esta investigación propone mejorar la precisión de los modelos SIG de zonificación de ocurrencia de inestabilidad de laderas con la integración de información de ultra alta resolución. Para comprobar la eficiencia del modelo se comparó la zonificación con insumos a 3 diferentes escalas, generados tomando como insumos modelos de elevación digital a 5m, 1, y 10 cm (escalas 1:250,000; 1:50,000 y 1:5,000 respectivamente). Como método de validación, se desarrolló un algoritmo cartográfico automatizado de deslizamientos históricos llamado Método de Conexión Topográfica, TCM, que fue comparado con una técnica predecesora, el Método de Conexión de contornos, CCM, definiendo su nivel de precisión, comparando con técnicas manuales.

Contribuciones y Conclusiones: Los resultados de la zonificación indican que más del 70% del terreno estudiado, es decir más de 322.7 km², se encuentra en las categorías de Medio a Muy Alta probabilidad de ocurrencia. Por otro lado, el método de validación desarrollado, TCM presentó una mejora del 14% con respecto a su predecesor. Mediante la revisión histórica se registró una cobertura de deslizamientos históricos de 15.61km². De los resultados se puede determinar que del 86 al 95% de la cobertura mapeada por deslizamientos históricos es coincidente con las categorías de mediana a alta probabilidad de ocurrencia, dando un valor más bajo al modelo de 1m, ocasionando mayor dispersión en los datos debido a la mejora en la resolución, dándole una ventaja a la generalización topográfica del modelo de 5m. Sin embargo, el error promedio de precisión calculado en modelaciones a escala local (de 0.1m de resolución) indica una mejora del 93% con respecto al promedio de error de precisión métrica espacial registrado entre los modelos mediano y grueso, bajando de 1.53 a 0.09 respectivamente. Además de registrarse valores de error máximo de +/-12m entre los modelos grueso y mediano, que mediante el método planteado por el proyecto, se reducen a +/-2m para los modelos a escala local. Por otro lado, el cambio de cobertura entre el periodo evaluado del 2010 al 2018 es del 40%, demostrando la necesidad de actualizaciones periódicas de los datos para la generación de modelos de susceptibilidad acordes con la realidad de esta zona altamente cambiante.

FIRMA DEL ASESOR: _____

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Expansión poblacional y sus problemas.

A escala mundial se ha registrado un incremento en los eventos catastróficos causados por fenómenos naturales y un aumento en los daños ocasionados. Cualquier fenómeno natural puede tener efectos negativos en la gente, la infraestructura o el ambiente, ya sean desastres hidro-meteorológicos como huracanes, inundaciones, tormentas, tornados, inclusive incendios o la propagación masiva de enfermedades. La identificación oportuna de fenómenos a los que se encuentra vulnerable la población permitirá crear medidas preventivas para mitigar los daños ocasionados por eventos catastróficos. La cartografía de riesgos localiza y brinda información de las zonas más vulnerables, así como la posible magnitud de los daños. Como definición, se reconocen a las zonas metropolitanas como la extensión territorial que incluye una ciudad central y las unidades político-administrativas contiguas. Estas unidades deben tener características de urbanización, como sitios de trabajo o lugares de residencia para trabajadores fuera de actividades agrícolas, manteniéndose en interrelación directa con la ciudad (Unikel, Ruiz, & Garza, 1978). En México se registran 59 zonas metropolitanas con aproximadamente 63 millones de habitantes en total (CONAPO, 2010), la ZMM, se encuentra entre las tres zonas metropolitanas más grandes (Desarrollo Urbano, 2017).

Entre los temas que más interés tiene la política actual en México es el desarrollo sustentable de las ciudades, el cual debe enfocarse en los diferentes niveles de desarrollo, ciudades accesibles, bien conectadas, seguridad hídrica, energética y alimentaria, transición energética, movilidad sostenible, ambiente limpio y adaptación al cambio climático. Es decir, el objetivo primordial es el de mejorar la vida urbana de la población en general. Sin embargo, sigue siendo un tema difícil en ciudades grandes. En Monterrey, el crecimiento intensificado de la población ha rebasado los límites funcionales, por lo que la ZMM, se encuentra en constante expansión, tan solo el pronóstico de crecimiento a 2019 plantea la posibilidad de albergar a 4,727,410 habitantes, en una tasa de aumento anual promedio de 1.26%. Para 2010, ya se registraban 4,106,054 habitantes, en una densidad media de 109.1 hab/ha, (CONAPO I. S., 2010). Sólo en 15 años (medido de 1990 a 2015), el crecimiento demográfico se registró un crecimiento poblacional de 33 % (Desarrollo Urbano, 2017), pronosticando otro crecimiento del 25% para 2030, según estimaciones del CONAPO, con base en proyecciones de la población de los municipios de México, 2010-2030.

1. Introducción

Tabla 1. Datos de superficie en comparación con la cantidad de población en un intervalo de tiempo determinado (1990-2010) para las ZMM y ZMVM Zona Metropolitana de Valle de México, tomado de (CONAPO I. S., 2010).

ZM	Superficie 2010 (km ²) únicamente Zona Urbana	Densidad media urbana 2010 (hab./ha)	Población (número de habitantes)				
			1990	1995	2000	2005	2010
ZMM	6,794	109.1	2,666,809	3,100,633	3,374,361	3,738,077	4,106,054
ZMVM	7,866.1	160.1	15,563,795	17,297,539	18,396,677	19,239,910	20,116,842

Teóricamente, el crecimiento territorial de la ciudad se planea con antelación, de acuerdo con la ley de Ordenamiento Territorial de los Asentamientos Humanos y de desarrollo urbano del estado de Nuevo León (DOF, Diario Oficial de la Federación, 1999), que, con base en los Atlas de riesgos sirven como un instrumento para la planeación de las zonas conurbadas, junto con la dirección de protección civil Estatal y Municipal. Tomando en cuenta las áreas preservadas y no urbanizables por la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (DOF, Diario Oficial de la Federación, 1988). Sin embargo, también es destacable, que de las regiones periféricas apenas el 8.97% cuenta con servicios urbanos y de equipamiento; esto es, que del total construido, apenas este porcentaje se considera dentro de los lineamientos existentes. El crecimiento acelerado de la población supera las expectativas actuales y con ello se aleja de lo reflejado en los estudios previos de sitio, estudios que se realizan con base en buena información, pero que por razones temporales debería considerarse obsoleta.

Tabla 2. Crecimiento urbano para la ZMM (Desarrollo Urbano, 2017).

ZMM	1980	1986	2000	2015
No. Municipios	5	9	9	14
Habitantes	2,094,857	2,521,397	3,236,604	4,245,512
Superficie total (Ha)	12,000	36,000	54,000	115,000
Densidad (Hab/Ha)	166	69.85	59	39

1. Introducción

1.2 Antecedentes de la Modelación SIG

Este proyecto se centra en la zonificación por probabilidad de inestabilidad de laderas, que para fines prácticos del presente estudio será implementado también como “proceso de remoción en masa” (Alcántara Ayala & Murillo García, 2008; Gary, McAfee, & Wolf, 1972). Este proceso puede ser también definido en la bibliografía técnica científica como “deslizamiento de ladera” y “procesos gravitacionales” (Alcántara Ayala, Echavarría Luna, Gutiérrez Martínez, Domínguez Morales, & Noriega Rioja, 2001; Terzaghi, 1950). El diagrama de conceptos implementado en el proyecto se muestra en la Figura 1. Aunque, es importante recalcar que existen autores que relacionan los términos de manera diferente, como es el caso de (Penck, 1984), quien subdivide el término de remoción en masa del concepto de deslizamiento, argumentando que se refiere al proceso en el que se involucra un movimiento por transporte, ocasionado por agua, aire o hielo.

Los procesos de remoción en masa se definen en esta investigación como el deslizamiento de tierra, roca o suelo, pendiente abajo, causado por efectos de la gravedad (Cruden, 1991; Alcántara Ayala & Murillo García, 2008). A su vez, la inestabilidad del terreno se subdivide en caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos (rotacionales y traslacionales) y las expansiones o desplazamientos laterales (vuelcos o caídos) como se muestra en la Figura 1 (Cruden & Varnes, 1996).

Los procesos de remoción en masa representan una amenaza importante sobre las zonas urbanizadas. Una manera de gestionar el desarrollo urbano para evitar desastres desencadenados por este tipo de fenómeno requiere de la apropiada caracterización del sitio de manera espacio-temporal, a través de herramientas cartográficas que permitan la localización de los sitios más vulnerables (Alcántara Ayala & Murillo García, 2008).

Las laderas, están propensas a presentar cambios en el porcentaje de estabilidad, debido a diferentes factores, tanto internos como la presencia de diaclasas, o fracturas en la roca o externos como erosión, lluvia o sismos (Alcántara Ayala, Echavarría Luna, Gutiérrez Martínez, Domínguez Morales, & Noriega Rioja, 2001). Éstos últimos, actúan como factores desencadenantes, al incrementar o potenciar los daños y los esfuerzos internos (Jebur, Pradhan, & Tehrany, 2014).

El análisis de los deslizamientos a escala regional se ha estudiado a través de modelos multi-criterio en ambiente SIG, donde se combinan los factores involucrados para determinar, espacialmente, los lugares más susceptibles ante la inestabilidad. Estos modelos toman en cuenta los mecanismos básicos involucrados, presentando caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos, expansiones, desplazamientos laterales, o una combinación de varios componentes, lo que se conoce como movimientos complejos (Gupta, Saha, Arora, & Kumar, 1999).

1. Introducción

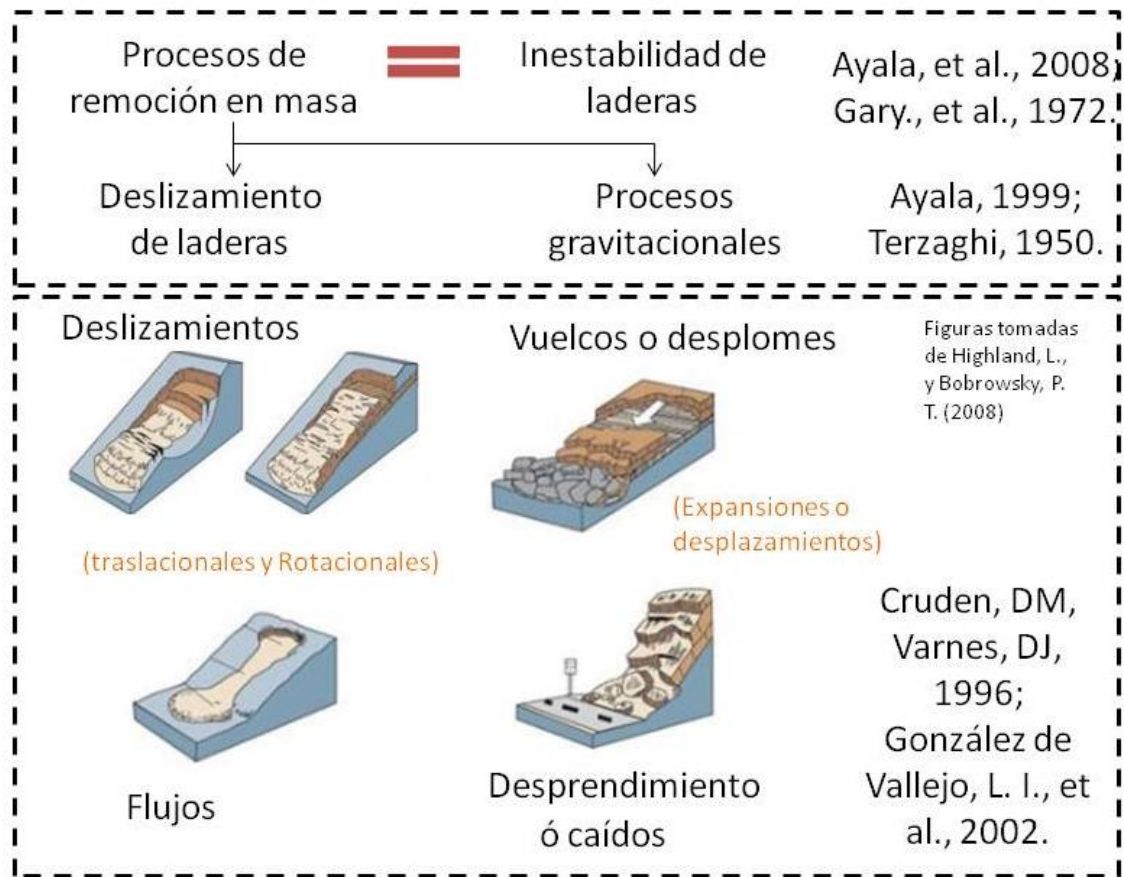


Figura 1. Tipos de inestabilidad de laderas. Adaptado de (Alcántara Ayala & Murillo García, 2008; Terzaghi, 1950; Highland & Bobrowsky, 2008; Cruden & Varnes, 1996; González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Algunos estudios se enfocan en el desarrollo de los factores que detonan la inestabilidad de manera directa, como la presencia de precipitación máxima (Chen & Lee, 2003), o, la influencia de terremotos como factor desencadenante (Huang, Pei, Fan, Zhang, Li, & Li, 2012), e inclusive se considera el cambio de uso de suelo como un factor de influencia importante en la ocurrencia de deslizamientos (Glade, 2003). A pesar de eso, la mayoría de estas investigaciones coinciden en que la topografía del sitio es uno de los factores más importantes, sin embargo, los datos utilizados en la mayoría de los casos son de escala 1:25,000 (Aleotti & Chowdhury, 1999).

Zonificar el problema consiste en categorizar la zona asignándole un grado o porcentaje de probabilidad de ocurrencia del fenómeno (Varnes, 1978). Los mapas creados por estos métodos de categorización sirven como una vista rápida del grado de peligro que presenta una zona, ahorrando tiempo en la toma de decisiones sobre planeación urbana, o para la elección de puntos específicos en donde se requiera un

1. Introducción

estudio técnico de mayor detalle y como sustento para conseguir fondos en caso de desastre. Esta información también puede compararse con información de vulnerabilidad social y económica para determinar zonas prioritarias. Este tipo de trabajo representa una herramienta útil para la planificación urbana, delimitando zonas estables para construcción, como edificios, casas habitación, caminos y zonas donde se requiere una reubicación de lo ya establecido y medidas de mitigación ante este tipo de peligro.

La determinación espacial de zonas susceptibles al fenómeno de inestabilidad de laderas y la cuantificación de características topográficas, geomorfológicas y ambientales permitirá desde la óptica de responsabilidad social el planteamiento de estrategias de prevención, planeación y mitigación del área urbanizada dentro del área de estudio, así como la planeación urbana futura. Parte de este trabajo se realiza con la información que ya se encuentra disponible, tomando en cuenta el trabajo realizado por las mismas dependencias gubernamentales, apegándose a leyes de transparencia impuestas dentro del País (DOF, Diario Oficial de la Federación, 2016). Con esto se toma la misma información del gobierno para realizar un mapa que pueda ser útil para ellos mismos.

En México, el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, publica el mapa nacional de inestabilidad de laderas (2014), escala 1:50,000. Por el estado de Nuevo León se presenta en la Gaceta Municipal de Monterrey el estudio del Atlas de Riesgo de Nuevo León (2012), el cual publica y establece las zonas categorizadas por porcentaje de probabilidad por inestabilidad de laderas a una escala 1:50,000 (DOF, Periódico Oficial, 2013). Ambos muestran la afectación de los fenómenos de remoción en masa en municipios como: San Nicolás de los Garza, donde se exhiben problemas por volteo y deslizamientos en el flanco sureste del Cerro del Topochico; General Escobedo que presenta zonas de derrumbes por volteos y deslizamientos en la porción flanco sureste de Los Potreros y al noreste de Sierra de las Mitras. García, donde existen desarrollos habitacionales cercanos a Sierra El Fraile y Sierra de las Mitras y donde las corrientes provenientes de cañadas de la sierra y el arrastre de rocas ponen en peligro a la población. Santa Catarina presenta volteos y deslizamientos frecuentes en el flanco suroeste de Las Mitras y al sur en la Autopista Monterrey-Salttillo; así también San Pedro Garza García presenta deslaves en áreas residenciales en el Cerro de la Corona; Guadalupe, Monterrey y Santiago donde se observan deslizamientos y caídos en el Cerro de la Silla y Cañón del Huajuco.

La técnica relacionada con el mapeo de fenómenos de remoción de masas tiene más de 4 décadas asociándose, a métodos que involucran sensores remotos a diferentes escalas (Goetz, Guthrie, & Brenning, 2011). Los avances en la tecnología LIDAR permiten llegar a un nivel de resolución de datos que recientemente se ha incorporado a los estudios de remoción en masa, especialmente por su gran potencial para la evaluación de factores topográficos y geotécnicos. El uso de datos LIDAR y su fusión con otros

1. Introducción

sensores de alta resolución por medio de un SIG representan el mejor método de evaluación de las características morfológicas de la superficie real. En el nivel regional este tipo de tecnologías brindan la precisión necesaria para la determinación de movimientos de rocas de distintos tamaños en laderas. Al ser una tecnología activa de alta resolución, el LIDAR es capaz de proporcionar mediciones topográficas tridimensionales precisas que reconstruyen la geometría de la pendiente, para localizar el área fuente de caída de rocas, lo cual permite disminuir los sesgos de la modelación, que anteriormente sólo se basaba en deducciones empíricas de los geocientíficos involucrados en los estudios (Anbalagan, 1992).

Uno de los métodos más comunes para modelar la inestabilidad de una ladera es la suma lineal ponderada de los parámetros que intervienen en el proceso, tales como: el tipo de roca del que está conformado el talud, la orientación y buzamiento de las pendientes del terreno, la cobertura del suelo, entre otros. (Van Westen, Van Asch, & Soeters, 2006). Se ha utilizado este método haciendo hincapié en la dificultad para determinar la probabilidad temporal y que los resultados del modelo dependen directamente de la información que se ingresa; por lo tanto, la falta de información o detalle en los insumos de entrada representan una desventaja en el mapa resultante.

El modelo SIG presentado en este documento es una combinación del procedimiento planteado por Saha, Gupta, & Arora (2002) y anteriormente en Gupta, Saha, Arora, & Kumar (1999), en donde los parámetros con mayor influencia son rasterizados y recategorizados para resolverse en una suma lineal ponderada. Así mismo, el método propuesta por Mora-Vharson, y a su vez propuesta por Mora & Vahrson (1993), implementada en Barrantes Castillo, Barrantes Sotela, & Núñez Roman, 2011 (2011) en donde también se utiliza la superposición de modelos cartográficos, asignando índices para algunos factores específicos. Los modelos SIG se desarrollan tomando en cuenta factores ambientales como lo son la litología, la forma del relieve, así como arroyos, cárcavas e información de cobertura del terreno e infraestructura antropogénica.

Por todo lo anterior, algunos autores proponen una estandarización de los métodos, así como una categorización de los diferentes tipos de modelos, dependiendo de los parámetros utilizados y el alcance. Esta cartografía de zonificación puede definirse como mapas de riesgo, peligro, susceptibilidad y/o históricos (Corominas, Frattini, Cascini, Malet, Fotopoulou, & Pitilakis, 2014), como se observa en la Figura 2. El alcance de este proyecto se basa en los modelos de susceptibilidad. Los niveles se definen a continuación:

- Mapas de riesgo: es el cálculo de la exposición que se tiene, frente al riesgo de ocurrencia del fenómeno.

1. Introducción

- Mapas de peligro: modelo de probabilidad basado en los factores condicionantes y al menos un factor detonante, aportando un cálculo de periodo de retorno al fenómeno de estudio.
- Mapas de susceptibilidad: modelos en el que sólo se analizan los factores condicionantes.
- Mapas históricos: modelos que representan los sitios donde el fenómeno de inestabilidad de laderas se presentó en tiempos anteriores a la fecha de realización del mapa de susceptibilidad actual

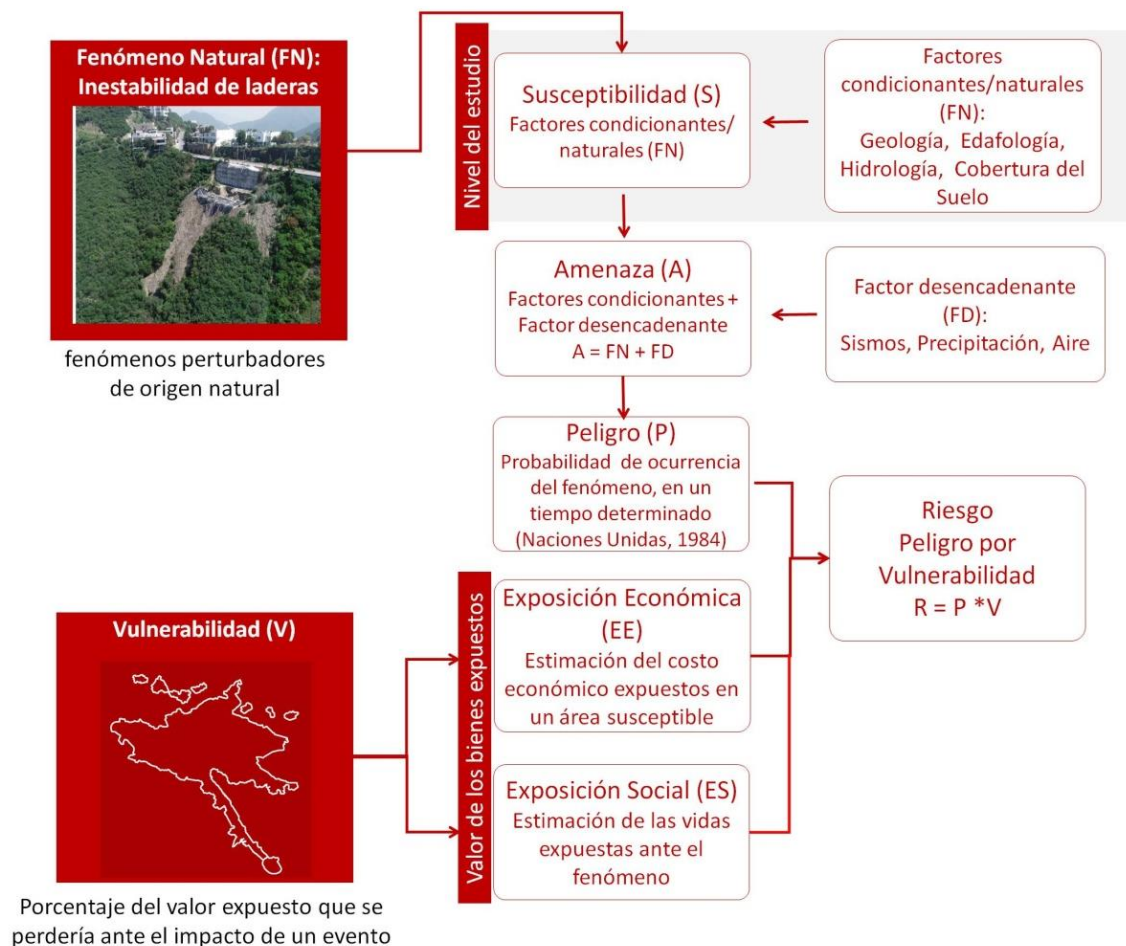


Figura 2. Diagrama de niveles de análisis para la elaboración de Atlas de Riesgos. Basado en (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

La zonificación por superposición de modelos cartográficos es ampliamente utilizada como herramienta de gestión para los planes para el desarrollo urbano y, como una medida preventiva, para iniciar medidas de mitigación del peligro ante este fenómeno, siendo que ya forma parte de los requisitos mínimos de estudio del atlas de

1. Introducción

riesgo nacional, emitido dentro del diario oficial de la federación, con fecha del 21 de diciembre del 2016. En dicho documento se estipula que *“Para la evaluación del riesgo por inestabilidad de las laderas, se deberá realizar un inventario de casos documentados de deslizamientos representativos de la zona o región por estudiar (Anexo 1). Posteriormente, se realizarán análisis de susceptibilidad basados en la investigación y determinación de los factores condicionantes que, de manera local o regional, influyen en la inestabilidad de laderas, según la información del inventario. Para la determinación del peligro se considerarán los factores detonantes de inestabilidad como la lluvia y el sismo, según la intensidad y umbrales que arroje el inventario. Esta información permitirá definir el tipo de inestabilidad: deslizamiento, flujo o caído (Anexo 2). Finalmente, la vulnerabilidad de los sistemas expuestos se determinará con base en las características físicas de dichos sistemas, y deberá considerar la intensidad del fenómeno, según el tipo de inestabilidad que se determine en los análisis de peligro que detallan en el siguiente punto.”*

La zonificación de la susceptibilidad por inestabilidad de laderas ha sido ampliamente estudiada sin llegar a una estandarización adecuada; presentándose adaptaciones dependiendo de la región de estudio. Anteriormente se han realizado modelaciones SIG como el presentado por Pourghasemi, Moradi, Aghda, Gokceoglu, & Pradhan (2014) en el nivel de susceptibilidad, para una región de Irán, también en Bui, Pradhan, Lofman, Revhaug, & Dick (2013) sobre una porción de Vietnam pero añadiendo el parámetro de lluvia intensa, al igual que Althuwaynee, Pradhan, & Ahmad (2015) incluyendo la lluvia con periodo de retorno. Por otro lado, (Xu, Xu, Dai, Xiao, Tan, & Yuan, 2012) utilizan el modelo para obtener un mapeo de una zona en China, tomando como factor desencadenante los registros sísmicos históricos. Recientemente este método de zonificación se aplica a zonas incluso más grandes, utilizando datos cualitativos, como en lo propuesto por (Gaprindashvili & Van Westen, 2016).

Según Lario Gómez & Bardají Azcárate (2017) los movimientos de laderas se pueden clasificar en: desprendimiento, los cuales pueden ser caídos o derrumbes, vuelcos, deslizamientos, extensiones laterales, flujos, movimientos complejos, movimientos sin rotura o previos a la rotura, procesos de meteorización, erosión, inundación y sedimentación.

Los factores condicionantes involucrados en los modelos de susceptibilidad de movimientos de ladera se pueden clasificar en:

- Relieve
- Características litológicas y sedimentológicas
- Estructura
- Características hidrogeológicas
- Vegetación (Cobertura del suelo)
- Geomorfología

1. Introducción

- Clima

Los factores desencadenantes usados para generar los mapas de peligro por los movimientos de ladera pueden ser:

- Actividad sísmica
- Vulcanismo
- Precipitaciones
- Actividad antrópica/ urbanización
- Deformación tectónica

En cuestión de desastres naturales, los sensores remotos son una fuente de información, cuya utilidad ha sido probada en muchas ocasiones alrededor del mundo. Los sensores remotos se han implementado en el mapeo y monitoreo de todo tipo de fenómenos naturales, como sismos, fallamientos, actividades volcánicas, inundaciones, incendios y los deslizamientos de laderas no son la excepción (Joyce, Belliss, Samsonov, McNeill, & Glassey, 2009). Aunque, los sensores remotos son muy utilizados dentro de programas actuales de monitoreo, mapeo, registro y predicción de daños, aun se siguen realizando investigaciones para mejorar las técnicas implementadas, incentivando la incorporación de nuevos sensores, más accesibles y prácticos de usar.

Algunos de los problemas más comunes que pueden presentarse en la calidad de los insumos son: 1) Intervalo de temporalidad y periodicidad de la información histórica, 2) resolución de los datos ligada a la escala de trabajo 3) cobertura espacial de los datos y 4) la disponibilidad de información de las variables que definen los factores desencadenantes.

- El intervalo de temporalidad y periodicidad se refiere al número de eventos registrados en el sitio y en los que se cuente con información útil de cada una de las variables que se ingresarán al modelo.
- El detalle de la información disponible para el estudio define la escala cartográfica a la que puede llegarse.
- La cobertura de los datos debe ser la misma para todas las capas en el modelo de suma ponderada.
- Lluvias extremas y eventos sísmicos son ejemplos de variables desencadenantes.

La tecnología LIDAR, crea la información 3D (Benhamu & Doytsher, 2003; Larsson, 1991) al proyectar un haz de luz láser que incide sobre un objeto y entonces es regresado por reflectancia hacia el aparato donde se registra el tiempo que tardó en regresar. Esta información 3D dibuja y caracteriza la superficie y cobertura del suelo (Dubayah & Drake, 2000) con una nube de millones de puntos con información en XYZ, ha demostrado una amplia gama de aplicaciones y utilidad en diversos campos de la

1. Introducción

ingeniería (Bitelli, Dubbini, & Zanutta, 2004; Stoter J. E., 2000; Stoter & Gorte, 2003; Wang, Peethambaran, & Chen, 2018). Los logros de LIDAR en topografía y geodesia se basan en su alta resolución, precisión y alcance de la nube de puntos que difícilmente pueden lograrse con otro tipo de sensor remoto y que, además, tiene la posibilidad de manejarse geo-espacialmente.

Durante los últimos años se han ido desarrollando y perfeccionando técnicas de percepción remota con la finalidad de tomar datos estructurales en el campo sin alterar el medio físico que se pretende medir. La ventaja de usar VANT es entre otras, la gran cantidad de datos que pueden ser recopilados de manera rápida, no provoca daños o impactos ambientales, no se necesitan accesos terrestres ni permisos de ocupación, así como el hecho de que pueden ser los datos recopilados en áreas remotas, accidentadas o con cobertura vegetal.

El método fotogramétrico consiste en generar la reconstrucción de un objeto, a partir de fotografías estereoscópicas, con al menos un 70 % de traslape entre ellas, con la generación de una nube de puntos a partir de los puntos en común entre las imágenes con cambios de coloración y contraste entre los píxeles de la imagen. Por su inclinación y dimensiones, la reconstrucción del sitio se llevó a cabo desde dos vistas distintas: una aérea y una terrestre.

1.3 Clasificación de imágenes

La cobertura del suelo es una parte importante cuando se trata de modelar los fenómenos que pueden afectar un lugar específico; sin embargo, debido al crecimiento de la población, este elemento se encuentra en constante cambio.

El objetivo de la clasificación del suelo es obtener una representación medible del mundo real y se utiliza como complemento para diversos temas. Sólo en cuestión de desastres naturales, las imágenes obtenidas a través de sensores remotos se incluyen para el estudio en procesos de mitigación, preparación, respuesta y recuperación (Cartwright, 2005). Estos estudios están relacionados con todo tipo de desastres naturales (Joyce, Belliss, Samsonov, McNeill, & Glassey, 2009). También, se han realizado estudios para predecir la cobertura del suelo y examinar los efectos de la actividad humana (Nelson & Hellerstein, 1997; Berry & Mackey, 2018)

Para realizar la clasificación de manera remota, se utiliza la observación de imágenes obtenidas de la superficie terrestre, en las cuales se registra la cantidad de radiación que es reflejada o emitida sobre la superficie. La información se guarda en una matriz de píxeles, cada uno con una posición única en cuestión de filas o columnas, con un valor de intensidad correspondiente a la región espectral que fue capturada (Lucas, Janssen, & van der Wel, 1994). Una imagen está compuesta por tres bandas principales que, combinadas, exponen el color “real” del objeto. Dependiendo del satélite son las

1. Introducción

bandas espectrales que se registran; algunas van desde las 13 bandas, como las imágenes Sentinel, hasta 4 bandas como las imágenes SPOT (1, 2 y 3).

Una primera evaluación del territorio puede determinarse a partir de las capas vectoriales de INEGI, la cual está compuesta por una clasificación del suelo entre coberturas derivadas de la actividad humana como zonas industriales y urbanas, así como los diferentes tipos de vegetación presentes. Estas capas vectoriales se encuentran en escala 1:250,000, pertenecientes a la Serie V. Después de las capas generadas en 1980, 2005, 2009 y 2012, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, presenta su más reciente actualización, generada durante el periodo 2011 a 2013 correspondiente a la utilizada como base en este documento, es decir, la serie V (INEGI, 2014). Esta serie se generó a partir de imágenes satelitales del sensor Landsat del año 2011.

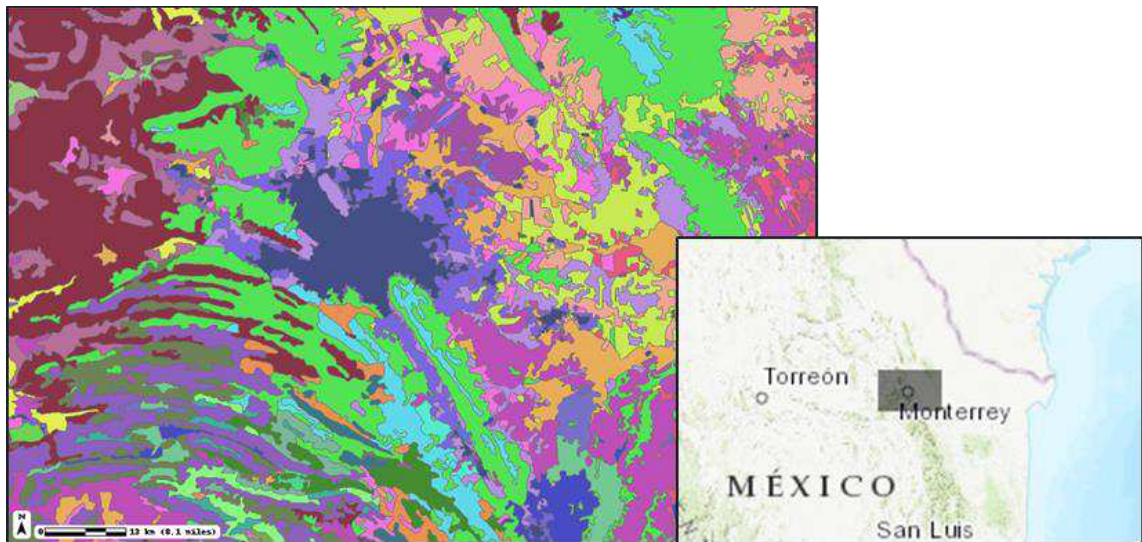


Figura 3. Cobertura de uso de suelo, INEGI 1:250,000, serie V. Modificado de INEGI (véase simbología en Anexo 1).

La resolución es un tema importante cuando se trata de procesar imágenes de satélite. Entre mayor resolución tenga la imagen fuente, mejor será la correlación con el uso de suelo “real”; sin embargo, tiene que plantearse en una relación costo-beneficio (Fisher, Acosta, Dennedy-Frank, Kroeger, & Boucher, 2018). Las imágenes utilizadas para clasificación de uso del suelo provienen de satélites de acceso libre, como Modis, Landsat, y Sentinel, con una resolución de 250, 30 y entre 10 y 20 metros por pixel respectivamente, aunque también existe otras fuentes, que involucran un costo, pero que cuentan con mejor resolución como los provenientes del satélite Spot (1,5 metros, Spot 6 y 7) y los provenientes de las compañías Digital Globe (desde 46 cm, pancromático capturado por WorldView2) y GeoEye (desde 30 cm por pixel, pancromático de GeoEye-2, absorbida por Digital Globe en 2013). En la Tabla 3, se

1. Introducción

muestra la relación entre los deslizamientos que pueden ser mapeados conforme a la resolución de los insumos utilizados.

Tabla 3. Tabla de relación entre el tamaño de los deslizamientos que pueden mapearse con respecto a los insumos utilizados. Modificada de (Mantovani, Soeters, & Van Westen, 1996; Wang Z. , 2004; Zhang, Gong, Zhao, & Zhang, 2005).

Fuente		Resolución Espacial (m)	Tamaño del deslizamiento (m)
LandSAT-5	MSS	80	800
	TM	30	300
LandSAT-7	ETM	30	300
	PAN	15	150
SPOT-1,2,4	XS	20	200
	PAN	10	100
Sentinel	XS	20	200
	XS	10	100
SPOT-5	XS	10	100
	PAN1	5	50
	PAN2	2.5	25
IKONOS	XS	4	40
	PAN	1	10
QUICKBIRD	XS	2.44	25
	PAN	0.61	6
Fotos aéreas 1:50,000		0.5	5
Fotos aéreas 1:25,000		0.25	2.5
Fotos aéreas 1:10,000		0.1	1

La imagen utilizada en este proyecto proviene del satélite Sentinel 2. Este satélite fue lanzado por la European Space Agency (ESA), como parte del programa Copérnico para la Observación de la Tierra. El objetivo de este programa era suministrar información actualizada y de fácil acceso para gestionar cuestiones de medio ambiente y cambio climático (Borrás, Delegido, Pezzola, Pereira, Morassi, & Camps-Valls, 2017). Las imágenes Sentinel, en sus versiones Sentinel 1 y 2 han sido ampliamente utilizadas ya sea como herramienta para prevenir el daño provocado por desastres naturales (Donezar-Hoyos, y otros, 2017) o para monitorearlos cuando son temporales, como las inundaciones (López-Caloca, Tapia-Silva, & Rivera, 2018). También se usa como complemento de imágenes de menor resolución como Landsat, mejorando los resultados de 5 a 4% (Forkuor, Dimobe, Serme, & Tondoh, 2018; Varade, Sure, & Dikshit,

1. Introducción

2018; Haas & Ban, 2018). Para facilitar el manejo y procesado solo se utilizaron las bandas 1, 2, 3 y 4. Las bandas 3 y 4 se eligieron por su relación con la información vegetal y la banda 2 por su alta correlación con áreas urbanas, además de su baja correlación espectral interbanda (Erbek, Özkan, & Taberner, Comparison of maximum likelihood classification method with supervised artificial neural network algorithms for land use activities, 2004).

Tabla 4. Comparación de cobertura espectral, modificada de (Stumpf, Holderied, & Sinclair, 2003; Zhu, Wang, & Woodcock, 2015).

Regiones espectrales	Bandas espectrales (nm)		
	IKONOS	Landsat-7	Sentinel 2
Azul	445-515	450-520	458-453
Verde	510-595	530-610	543-578
Rojo	630-700	630-690	650-680
Infrarrojo cercano	760-850	780-900	855-875

Para determinar cuál es el mejor método de clasificación que se utiliza se debe experimentar sobre la zona en específico, ya que las comparaciones varían tanto en resultados que aún no es posible saber con exactitud si uno es mejor que otro, mantener las mismas variables, como la imagen que se utiliza, los niveles espectrales que se manejan y las mismas zonas de control, permitirá una buena comparación específica para la zona de estudio (Li, Wang, Wang, Hu, & Gong, 2014). En este proyecto se comparan las clasificaciones realizadas sobre una imagen Sentinel, realizadas mediante 3 métodos diferentes, para determinar cuál es el método que arroja una respuesta de mejor precisión para el área específica de estudio. Dos de estos métodos, se refieren a la clasificación de los píxeles, agrupándolos con base en respuestas similares diferentes, a partir de un vector de entrenamiento. Estas clasificaciones son Maximum Likelihood classification (MLC) y Gaussian Mixture Model (GMM). Por otro lado, se propone realizar la clasificación utilizando como insumo, la imagen tratada con un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual, normaliza los valores de intensidad de la imagen en un mismo intervalo, realzando la vegetación.

Propuesta de investigación

1.4 Justificación

El mapeo físico del entorno es una herramienta necesaria en la planeación y gestión del desarrollo urbano. La conjugación del estudio del medio físico con el avance de tecnologías cada vez más precisas ofrece proyecciones mucho más cercanas a la realidad. Específicamente, la determinación espacial de zonas susceptibles al fenómeno de inestabilidad de laderas y la cuantificación de características topográficas, geomorfológicas y ambientales permitirá una mejor definición de sitios con alta probabilidad de ocurrencia de este fenómeno. La categorización de estos sitios, delimitará cuales son los que requieren prioridad para realizar estudios específicos en los que se definan estrategias de prevención y planeación antes de iniciar una construcción; es decir, la caracterización del terreno con respecto a la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, permite definir el tratamiento que se le dará con respecto al tipo de zonificación obtenido, poniendo especial atención en los sitios que se consideren con alta susceptibilidad ante tal fenómeno.

Durante mucho tiempo, el alto costo para la obtención de datos no permitía generar información de alta resolución para estudios regionales. Sin embargo, con la integración de nuevas metodologías como los VANT o LIDAR (aéreo y terrestre), ahora se pueden plantear metas que incluyan una mayor precisión. Aunque se considera que estos nuevos datos permiten identificar con mayor precisión métrica y espacial los problemas de inestabilidad en una ladera. Para el desarrollo de la apropiada comparación de los datos, se necesitan nuevas técnicas de validación que permitan definir el nivel de precisión de los modelos regionales.

Actualmente no se cuenta con la adaptación metodológica que asiente las bases del nivel de resolución que se requiere para realizar este tipo de modelación. Se cree, que la buena calidad de la información permitirá obtener un mapa de mayor precisión, que sea una base sólida para la toma de decisiones; sin embargo, se ignora la escala de las variables al enfocar el trabajo de investigación únicamente en definir un solo factor, el desencadenante. Es necesario definir, el alcance que tienen los mismos insumos a diferentes escalas, no solo de los factores que detonan la inestabilidad, sino de todos los elementos que integran el sistema natural, la mejora del nivel de precisión de estos mapas, también será sustento para exigir en un futuro, la apropiada planeación urbana

Este proyecto parte de la experimentación requerida para definir los niveles de trabajo, con la comparación estandarizada (determinando los insumos que corresponden a las diferentes escalas de trabajo) de tres modelos de probabilidad de susceptibilidad (de los factores condicionantes) de laderas. Comparando los resultados con sitios en los que ya han ocurrido deslizamientos.

1. Introducción

1.5 Hipótesis

Mejorar la resolución métrica de los datos que sirven como insumos en la generación de modelos predictivos de susceptibilidad de inestabilidad de laderas, podrá mejorar la precisión de la zonificación del mapa resultante, permitiendo hacer más eficiente la selección de los sitios que requieren la realización de estudios específicos de prevención.

1.6 Objetivo general

Definir y caracterizar el tipo de resultados que se pueden obtener dependiendo de los insumos utilizados para generar el modelo de zonificación de susceptibilidad de inestabilidad de laderas en ambiente SIG, mediante los factores básicos condicionantes.

1.7 Objetivos específicos

- Documentar, generar y procesar la información base oficial utilizada en los modelos actuales de inestabilidad de laderas para la ZMM, y su posterior re-categorización para generar un modelo SIG de escala subcontinental (1:250,000).
- Generación de un modelo SIG de susceptibilidad de mediana resolución (1:50000), generando la información base a partir del procesado de una imagen satelital multi-espectral y un MDE de 1m.
- Generación del algoritmo que automatice el mapeo de deslizamientos históricos para ser utilizado como medida de validación.
- Desarrollar e implementar un método para generar, a escala local (1:5000), con tecnología VANT y métodos como Structure From Motion, un modelo de elevación homologado, junto con una ortofoto digital, que puedan ser comparables a los insumos utilizados para la generación del modelo a escala mediana.
- Comparar los resultados obtenidos por los diferentes modelos SIG de susceptibilidad de laderas a escala subcontinental y mediana, con respecto a la caracterización histórica del medio natural ante el fenómeno de estudio, para evaluar el grado de concordancia de las modelaciones con el terreno estudiado.
- Validar la utilidad de los insumos digitales obtenidos mediante el método propuesto para procesamiento de insumos a escala local, mediante su comparación con la información base utilizada para los modelos subcontinental y mediano, obteniendo el error métrico esperado para cada insumo.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Área de estudio

El área de estudio está ubicada dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey, ZMM, perteneciente al estado de Nuevo León, en México. Comprende el municipio de Monterrey y los municipios aledaños correspondientes a su área conurbada, como San Nicolás de los Garza, Guadalupe, Santa Catarina y San Pedro Garza García, entre otros, Siendo este último, el que presenta la mayor cantidad de elementos que condicionan la inestabilidad de una ladera, reportándose deslizamientos de tipo volteo en el 40% de su cobertura, correspondiente a la Sierra de las Mitras, así como la presencia de deslizamientos en el 20 % del flanco Norte y Noreste de lo que corresponde de la Sierra Madre Oriental que pertenece a este municipio (Rodríguez, M., Valero, A., Navarro, I., y Bermúdez., J. E., en prensa, consultado en 2018).



Figura 4. Deslizamiento registrado en el Cerro de la Corona, perteneciente al Municipio de San Pedro, Garza García (Rodríguez, Valero, Navarro, & Bermúdez., consultado en 2018).

La ZMM, se encuentra localizada sobre el sistema Montañoso de la Sierra Madre Oriental, que está conformado por rocas sedimentarias de origen mesozoico y cenozoico que fueron plegados y arrastrados durante la orogenia laramide ocurrida entre el cretácico tardío y el Terciario Temprano (Eguiluz de Antuñano, Aranda García, & Marrett, 2000). La formación conocida como la curvatura de Monterrey se compone de pliegues con orientación NW-SE que cambian su orientación a E-W en la parte norte del municipio.

El polígono comprendido como el sitio de estudio se rige por la disponibilidad de la información que servirá como insumo dentro del modelo, como se muestra en la Figura 5. Uno de los insumos principales para la generación del modelo 1:50,000 es un modelo de elevación de 1 m obtenido por CNA. Este modelo de elevación fue

2. Marco teórico

segmentado conforme a la morfología, segregando el terreno correspondiente a los altos topográficos, abarcando los cerros Mitras, Topo Chico, La Silla y una sección de la SMO que concuerda con las zonas urbanas principales. Este polígono de cobertura tiene una extensión de 461 km². Para continuar con el proceso se calculó un área de influencia de 5 km alrededor del polígono principal, dando como resultado una extensión final del área de estudio de 1357 km², la cual corresponde a la línea perimetral azul mostrada en la Figura 5.

La ZMM, se encuentra rodeada por el frente de la Curvatura de Monterrey hacia el sur-sureste y comprendiendo el Cerro de la Corona, Cañón del Huajuco; así como del Cerro de la Silla al sureste, el Cerro de las Mitras al oeste y el Cerro del Topochico al norte y, aunque en menores dimensiones, pero igualmente presionados por el desarrollo urbano, los lomeríos del Cerro de las Águilas, la Loma Larga y algunas crestas menores en el área sur.

Para fines de demostración de los mapas resultantes se definieron áreas de interés, AOI (area of interest) a cuales también son proyectados dentro de la Figura 5. Estos rectángulos, sirven como acercamiento a las zonas que se consideran de mayor relevancia y dentro de los cuales se llevaron a cabo reconocimientos para trabajo de campo.

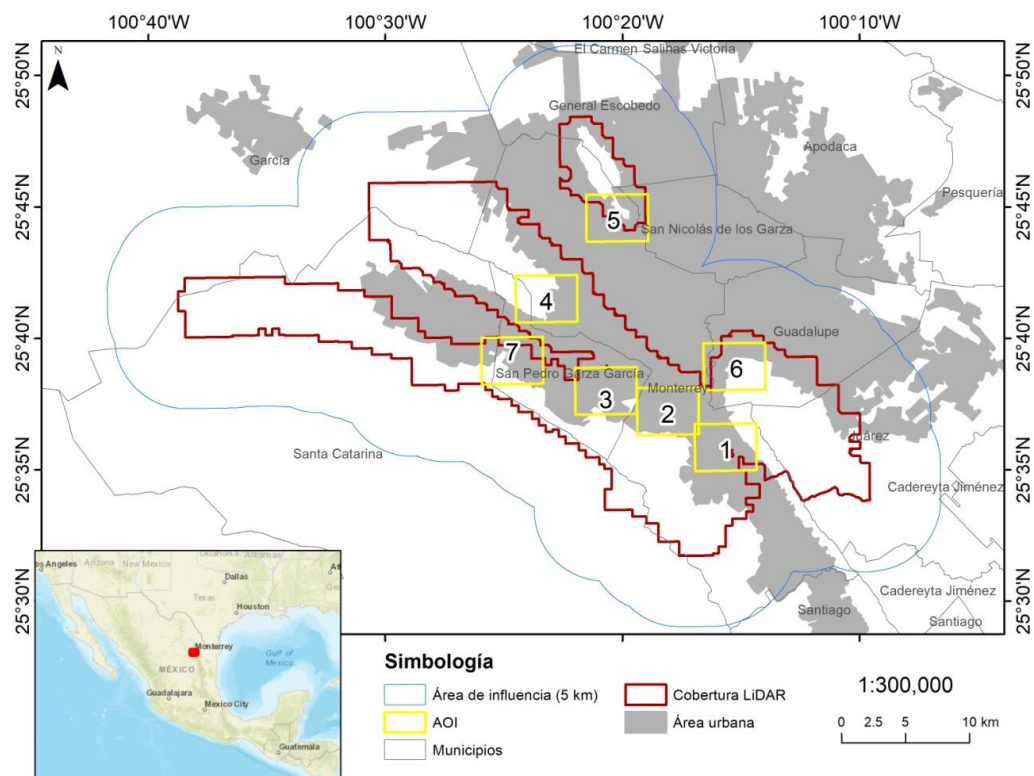


Figura 5. Mapa de ubicación del sitio de estudio.

2. Marco teórico

2.2 Características del medio natural

Marco tectónico y geológico

Geológicamente, la SMO está compuesta por rocas sedimentarias, plegadas durante la orogenia Laramide, Cretácico Tardío al Paleoceno-Eoceno (Ramos-Zúñiga, Medina-Ferrusquía, & Montalvo-Arrieta, 2012). Convirtiéndose en lo que se conoce como la curvatura de Monterrey (Chávez Cabello, 2016). El empuje generado por esta orogenia, así como los altos de basamento, el depósito central correspondiente al canal de Monterrey y el espesor de las evaporitas depositadas en la base de la columna estratigráfica, son los principales factores que condicionaron la geometría de la SMO en la ZMM (Chávez Cabello, Torres Ramos, Vázquez, Damián, Cossio Torres, & Aranda Gómez, 2011). La zona estudiada en este proyecto tiene una cobertura total de 1357 km², comprende la región al SW de la Sierra Cerro de la Silla. Al límite SW de la zona, se ubica el eje del anticlinal Jonuco. La morfología comprende una serie de anticlinales, que fueron erosionados de su centro, dando como resultado valles centrales, delimitados por estratos casi verticales que corresponden a los flancos de los altos topográficos aledaños.

La estratigrafía de la curvatura de Monterrey se conforma por rocas sedimentarias, principalmente de origen marino, y en menor proporción por rocas de origen continental. En la Tabla 5, se muestra una relación entre el tipo de roca mostrado dentro del mapa, vista en planta 2D, y la relación de cobertura superficial en km², conforme a la digitalización de los mapas físicos de INEGI escala 1:50,000 (Figura 6). La edad de estas rocas, varían desde el Jurásico Superior al Cretácico superior, con algunos sedimentos continentales del cenozoico. Las formaciones que componen esta zona son, desde el Jurásico superior, Minas Viejas, Zuloaga, La Casita y Pimienta; del Cretácico Inferior, Carbonera, Taraises, Cupido y La Peña; del Albiano-Cenomaniano, las formaciones Aurora y Cuesta del Cura; y del Cretácico Superior; Indidura, Agua Nueva, San Felipe, Parras, Méndez y parte del grupo Difunta (Michalzik, 1988).

Tabla 5. Porcentajes de cobertura por tipo de roca. Cálculo hecho sobre datos de INEGI para el polígono de estudio.

Símbolo	Descripción	Área (km ²)	Porcentaje de cobertura
al	Aluvión	611.39	45.05
bs	Brecha Sedimentaria	24.03	1.77
cg	Conglomerado	79.31	5.84
cz	Caliza	272.37	20.07
cz-lu	Caliza-Lutita	66.36	4.89
Jales	Aluvión	0.09	0.01
lu	Lutita	188.16	13.86
lu-ar	Lutita-Arenisca	111.14	8.19
M	Marmol	1.13	0.08
Y	Yeso	3.12	0.23

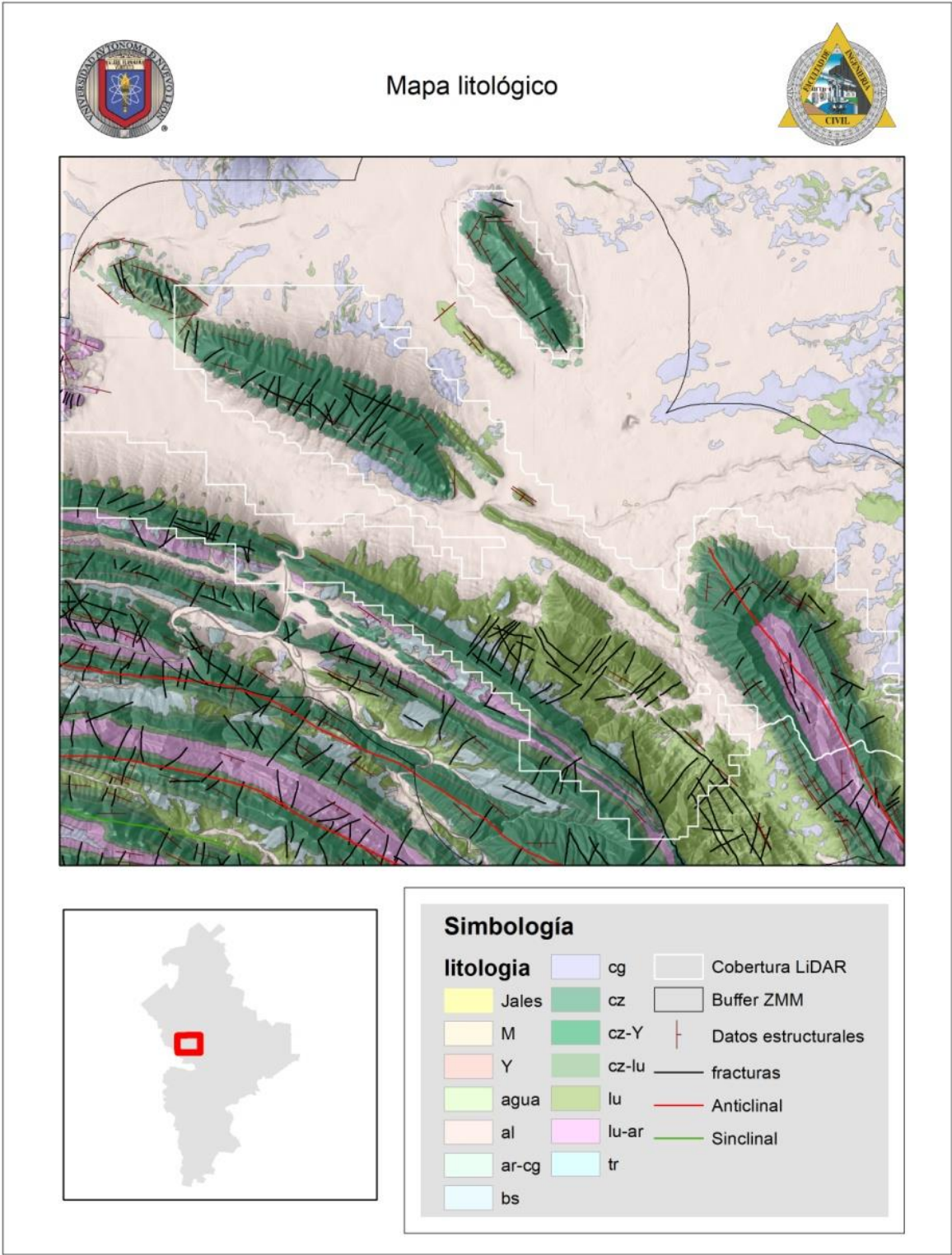


Figura 6. Mapa litológico del área de estudio basado en datos de INEGI (1:50,000/1:250,000).

2. Marco teórico

Evolución paleo geográfica

Triásico – Jurásico.

Durante el periodo comprendido entre el triásico tardío al Jurásico medio (pre-Calloviano), se acumularon capas rojas y sedimentos volcánicos en sistemas de grabens limitadas por fallas alrededor de Golfo (Stone, 1975; Todd & Mitchum Jr, 1977; Salvador, 1991). En el noreste de México, estos depósitos comprenden el Grupo Huizachal. Las capas rojas describen abanicos fluviales, aluviales no marinos y depósitos lacustres (Padilla y Sánchez, 1982; Michalzik, 1988). Estos depósitos sobreyacen discordantemente al basamento granítico Permo-Triásico o metasedimentario del Paleozoico Tardío. Los espesores varían entre los 300 m y 2000 m, restringiéndose a las cuencas de rift; (Wilson J. , Basement Structural Controls on Mexico Carbonate Facies in Northeastern Mexico-A Review, 1990; Stone, 1975).

La Formación La Joya, del Bathoniano a Calloviano (Wilson J. , Basement Structural Controls on Mexico Carbonate Facies in Northeastern Mexico-A Review, 1990), sobre yace discordantemente a la Formación La Boca, con una relación angular conservada en el Cañón Peregrina, al oeste de Ciudad Victoria (Corpstein, 1974). La Formación La Joya (55 a 120 m de espesor) consiste de llanuras costeras y lacustres, sedimentos siliciclásticos marginales marinos y no marinos a calizas de agua dulce (Padilla y Sánchez, 1982; Michalzik, 1988; Corpstein, 1974). Las capas rojas incluyen lutitas, limolitas, areniscas de grano grueso y conglomerados que registran rellenos de cuenca de rift restringida. La Formación La Joya supra yace a una discordancia dentro de los altos de basamentos y se encuentra contemporánea a las evaporitas Callovianas.

En el área de Monterrey-Salttillo, en el periodo comprendido del Calloviano a Oxfordiano Temprano (Jurásico medio a superior) los yesos de los afloramientos de la Formación Minas Viejas sobreyacen discordantemente a las capas rojas de la Formación Huizachal (Weidie, Wolleben, & McBride, 1972). Los depósitos marinos de esta formación están marcados dentro de incursiones marinas iniciales. El espesor pre-deformado (estimado cercano a los 1000 m), la distribución lateral y el ambiente de depositación son desconocidos.

Durante Oxfordiano Medio a Kimmeridgiano (Jurásico superior), La Formación Zuloaga se caracterizó por condiciones marinas abiertas (Zwanzinger, 1979; Padilla y Sánchez, 1982), con la transición de la etapa de ruptura y separación (en términos geológicos, rift y drift) del desarrollo del margen pasivo. En la ZMM se presentó como calizas con lentes de pedernal negros y eventualmente se presentan yesos y anhidrita en el anticlinal de Los Muertos y minas de yeso en Potrero Chico y en la Sierra del Fraile en su parte más interna.

Jurásico – Cretácico.

2. Marco teórico

Sobre la formación Zuloaga se presentan las formaciones La Caja y Pimienta. Estas formaciones se presentan en el noreste de México, como limolitas y lutitas marinas de grano fino, como facies marinas profundas sobrepuestas a los altos de basamento pre-existentes (González, 1976; Padilla y Sánchez, 1982; Echánove, 1986). Alternadamente, específicamente en la ZMM, se deposita la Formación La Casita (de edad Kimmeridgiano a Hauteriviano, Jurásico tardío a cretácico inferior) en un ambiente de aguas profundas que se formará en estructuras anticlinales de la Curvatura de Monterrey y en el Cerro de la Silla y representa un período de mayor afluencia de sedimentos clásticos (Stone, 1975; Smith R. , 1987; Michalzik, 1988).

La Formación Taraises (Berriasiano a Hauteriviano, Cretácico inferior) presenta facies de agua profunda y costeras equivalentes a las unidades medias y superiores de la Formación La Casita (Blauser, 1981; Smith C. , 1981). En la ZMM se presenta como estratos delgados con fracturas selladas por calcita y desarrollo de lentes de pedernal.

En el noreste de México y, en especial el Área de la Curvatura de Monterrey, sobre la formación Taraises se presentan los impresionantes estratos carbonatados de la Formación Cupido (de 700 m a 1200 m de espesor) de mediados del Cretácico Inferior (Barremiano a Aptiano Inferior). La formación La Peña (Aptiano Medio a Superior, finales del cretácico inferior) sobreyace a Cupido como calizas arcillosas de aguas profundas en capas delgadas, con intercalaciones de lutita y limolitas calcáreas y bandas de pedernal con amonitas.

La Formación Aurora (Albiano, final del cretácico inferior) se presentó como la segunda mayor fase de plataformas carbonatadas en el Cretácico desarrolladas en el noreste de México (Wilson J. , 1975; Smith C. , 1981; Lehmann C. T., 1997; Lehmann, Osleger, & Montañez, 1998; Lehmann, Osleger, & Montañez, 2000). En la ZMM, se presenta como calizas de estratificación masiva, con bandas de pedernal en la Curvatura de Monterrey y en el Cerro de la Silla.

La Formación Cuesta del Cura, con Facies de edad Albiano al Cenomaniano (Cretácico Medio) consiste en carbonatos pelágicos de agua profunda y lutitas acumuladas enfrente de plataformas marinas del Cretácico medio (Enos, 1974; Smith C. , 1981). En la ZMM se presenta como calizas competentes con lentes de pedernal negros en estratos delgados.

En el noreste de México, las cuencas de antepaís se desarrollaron al frente de la progresiva Sierra Madre, Área de Sabinas, Cuencas La Popa y Parras (González, 1976; Padilla y Sánchez, 1982). En la ZMM, la Formación Agua Nueva está conformada por calizas grises intercaladas con lutitas calcáreas en las Sierras Mitras, San Miguel y Topo Chico, así como en el cañón de la Huasteca.

La Formación Indidura (de edad Cenomaniano a Santoniano del Cretácico Superior) presenta dos miembros, las Formaciones Agua Nueva y San Felipe. En Nuevo León

2. Marco teórico

afloran en las sierras de El Fraile y San Miguel en estratos de calizas, margas y lutitas. La Formación Indidura es equivalente a la Formación Eagle Ford en la Cuenca de Sabinas y a la Formación Agua Nueva en la Cuenca de Burgos en el Noroeste de México. Dicha unidad estratigráfica aflora en el Cerro de las Mitras, flanco sur poniente de la Loma Larga, etc. Su edad es Cenomaniano- Turoniano. La Formación Agua Nueva se caracteriza por presentar horizontes de glauconita de color verdoso.

La Formación San Felipe es del Turoniano. Todas las rocas estudiadas corresponden a una Facies pelágica, la sucesión rítmica de calizas arcillosas y lutitas permite inferir que el depósito de la Formación San Felipe corresponde a una facies flysch, correspondiente a un flysch pelítico (Camper, 1977).

Finalmente, la Formación Méndez cubrió toda la zona nororiental de la ZMM conformada por lutitas calcáreas gris oscuro intemperizable, con intercalaciones de margas grises y verdosas. Las formaciones aquí presentadas se muestran de manera gráfica en relación al Periodo de depositación en la Figura 7, con la tabla estratigráfica de (Michalzik, 1988).

2. Marco teórico

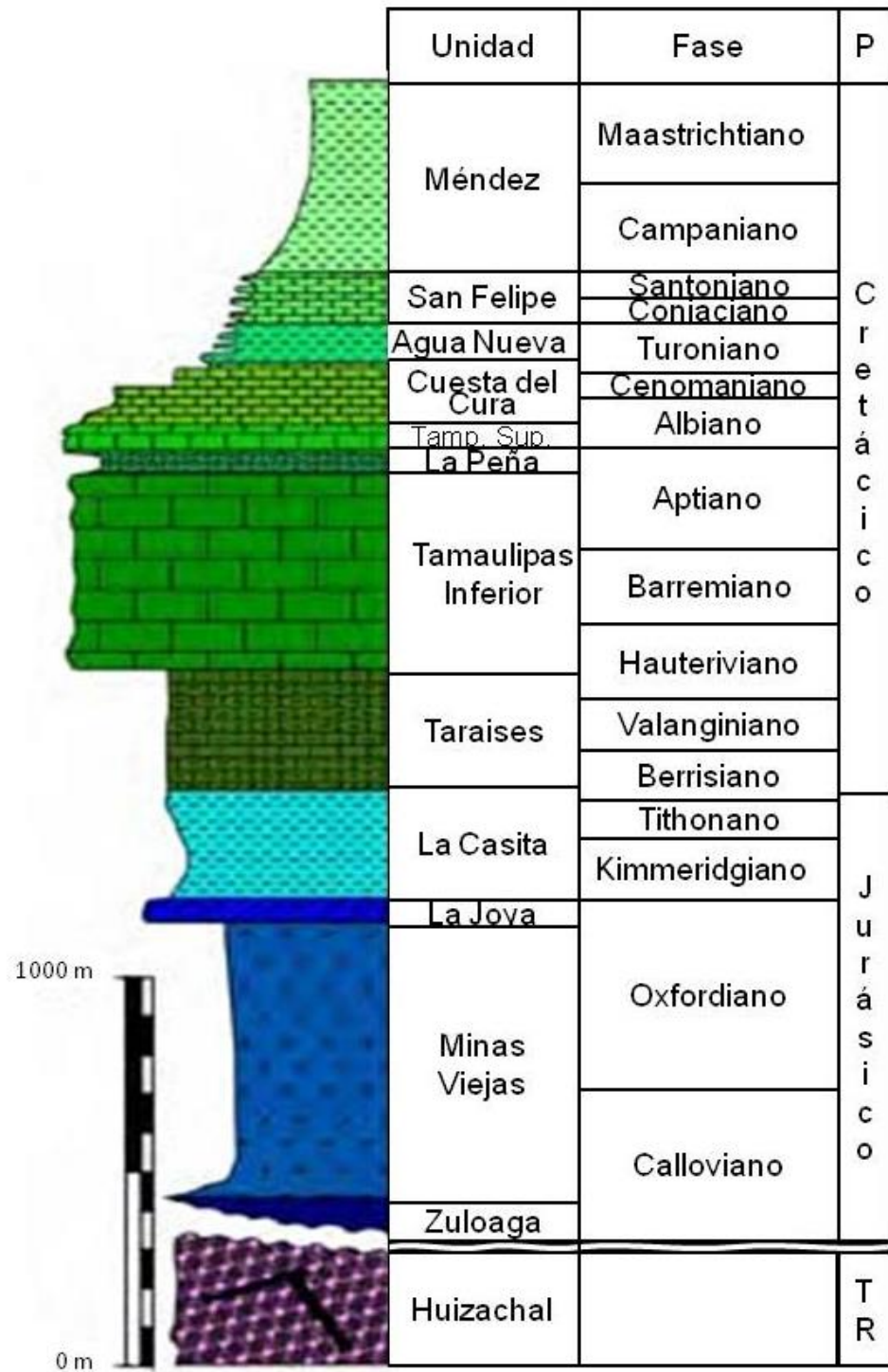


Figura 7. Tabla estratigráfica del NE de México de Michalzik (1988) posteriormente modificada por Chávez Cabello (2016).

2. Marco teórico

Sismicidad

Originalmente, La zona noreste de México fue considerada como una región asísmica o región A (Regionalización sísmica de México, como se muestra en la Figura 8), la cual se caracteriza por no tener un registro histórico o no haber reportado sismos grandes en los últimos 80 años y donde las aceleraciones del terreno son menores que el 10% del valor de la gravedad (Gutierrez, y otros, 1990).

El 2 de febrero de 2016 se inauguró la primera estación sismológica digital del Noreste de México, localizada en la Facultad de ciencias de la Tierra (Montalvo Arrieta, Gómez, & Valdés González, LNIG: Nueva estación sísmica digital en el noreste de México, 2006). Esta estación fue nombrada como LNIG o estación Linares. Anteriormente una estación mecánica autónoma de fabricación alemana, “Wiechert” fue colocada en el Cerro del Obispado en Monterrey, Nuevo León, desde 1913, aunque nunca se obtuvo información de ella (Montalvo Arrieta, Gómez, & Valdés González, LNIG: Nueva estación sísmica digital en el noreste de México, 2006).

Aunque solo el 5% de la energía sísmica se genera intraplaca (Talwani, 1999), los terremotos ocasionales pueden ser devastadores debido a que las ciudades al interior del continente no consideran criterios de mitigación para actividad sísmica en su diseño (Montalvo Arrieta, 2009). Entre los sismos reportados intraplaca para el Noreste se encuentra el de Parral Chihuahua, de 6.5Mw (Doser & Rodriguez, 1933). En Nuevo León, se han registrado sismos de baja intensidad que han pasado desapercibidos para la población. En la Figura 8 se muestra el mapa de sismicidad de 2017 del Servicio Sismológico Nacional.

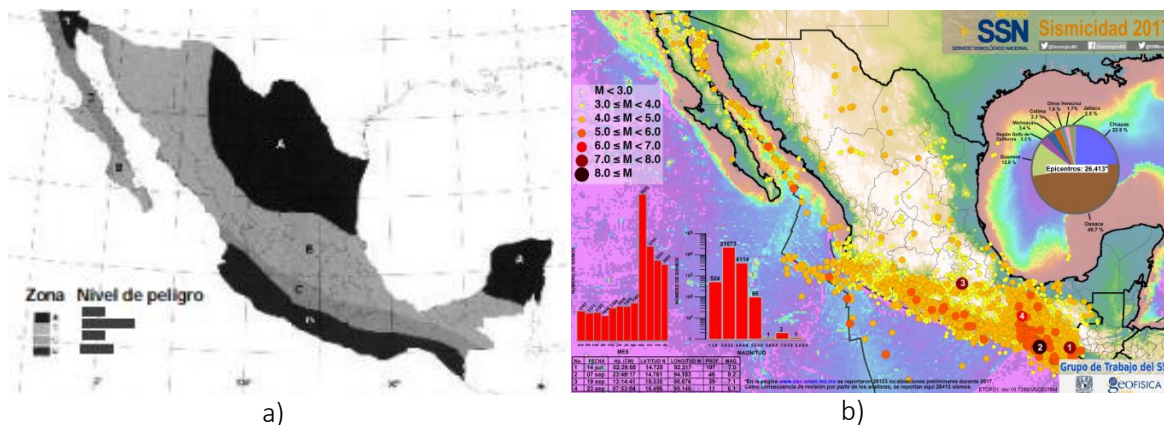


Figura 8. A) Regionalización sísmica de México (Gutierrez, y otros, 1990), b) Mapa de sismicidad Anual de 2017 (tomado del Servicio Sismológico Nacional SNN, revisado en 2018).

Clima

La precipitación es uno de los factores detonantes de los deslizamientos más importantes registrados para la ZMM. Una de las precipitaciones más extremas fue la registrada durante el Huracán Alex, en el año 2010, la cual ocasionó pérdidas de aproximadamente 2 mil millones de dólares (Cázares-Rodríguez, Vivoni, & Mascaro, 2017). Este evento fue precedido en el factor de intensidad por los Huracanes Gilberto en 1988 y Emily en el 2005.

El huracán Alex, alcanzó la categoría de Huracán nivel 2, registrando un viento de ~ 176 km/h con una presión de 946 mb. El recorrido del huracán duró 8 días registrándose desde el 24 de junio de 2010 al 2 de Julio de 2010 (Cázares-Rodríguez, Vivoni, & Mascaro, 2017). Aunque, este fenómeno de precipitación masiva cuya trayectoria no llegó a pasar sobre el área de estudio, sino 280 km más al sur, este trajo consigo más lluvia que sus antecesores, como se reporta desde las estaciones meteorológicas aledañas, entre ellas, la estación meteorológica “La Huastequita” mostrada en la Figura 9.

El clima predominante para el área de estudio, según los datos registrados de categorización por tipo de clima propuesto por INEGI, corresponde a un tipo de clima Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor que 18° , temperatura del mes más frio menor que 18° , temperatura del mes más caliente mayor que 22° . El cual se identifica como clase 4 de manera gráfica en la Figura 10, cubriendo una extensión de $\sim 500\text{km}^2$, como se muestra en la Tabla 6.

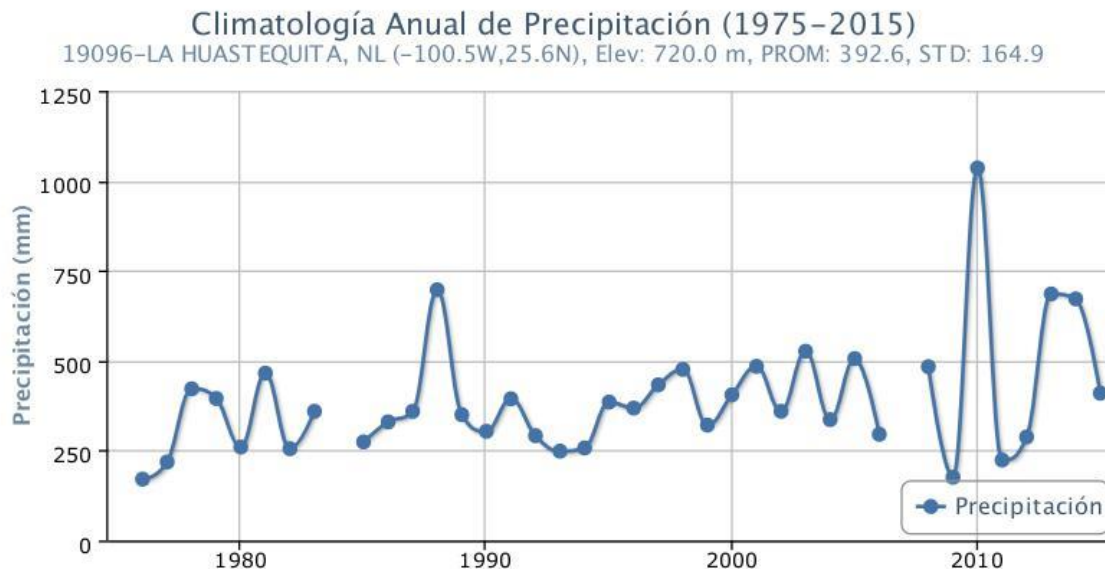


Figura 9. Estación meteorológica “La Huastequita”, gráfico tomado de la plataforma CLICOM.

2. Marco teórico

Tabla 6. Cobertura (en km²) de los diferentes tipos de clima presentes en el área de estudio con base de datos del INEGI.

ID	Descripción	Área (km ²)
1	Árido, semicálido, temperatura entre 18° y 22°, temperatura del mes más frío menor de 18°, temperatura del mes más caliente mayor de 22°.	216.9
2	Muy árido, semicálido, temperatura media anual entre 18° y 22°, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°.	206.6
3	Semiárido cálido, temperatura media anual mayor de 22°, temperatura del mes más frío mayor de 18°.	49.9
4	Semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18°, temperatura del mes más frío menor de 18°, temperatura del mes más caliente mayor de 22°.	499.5
5	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°, temperatura del mes más frío menor de 18°, temperatura del mes más caliente mayor de 22°.	384.2

2. Marco teórico

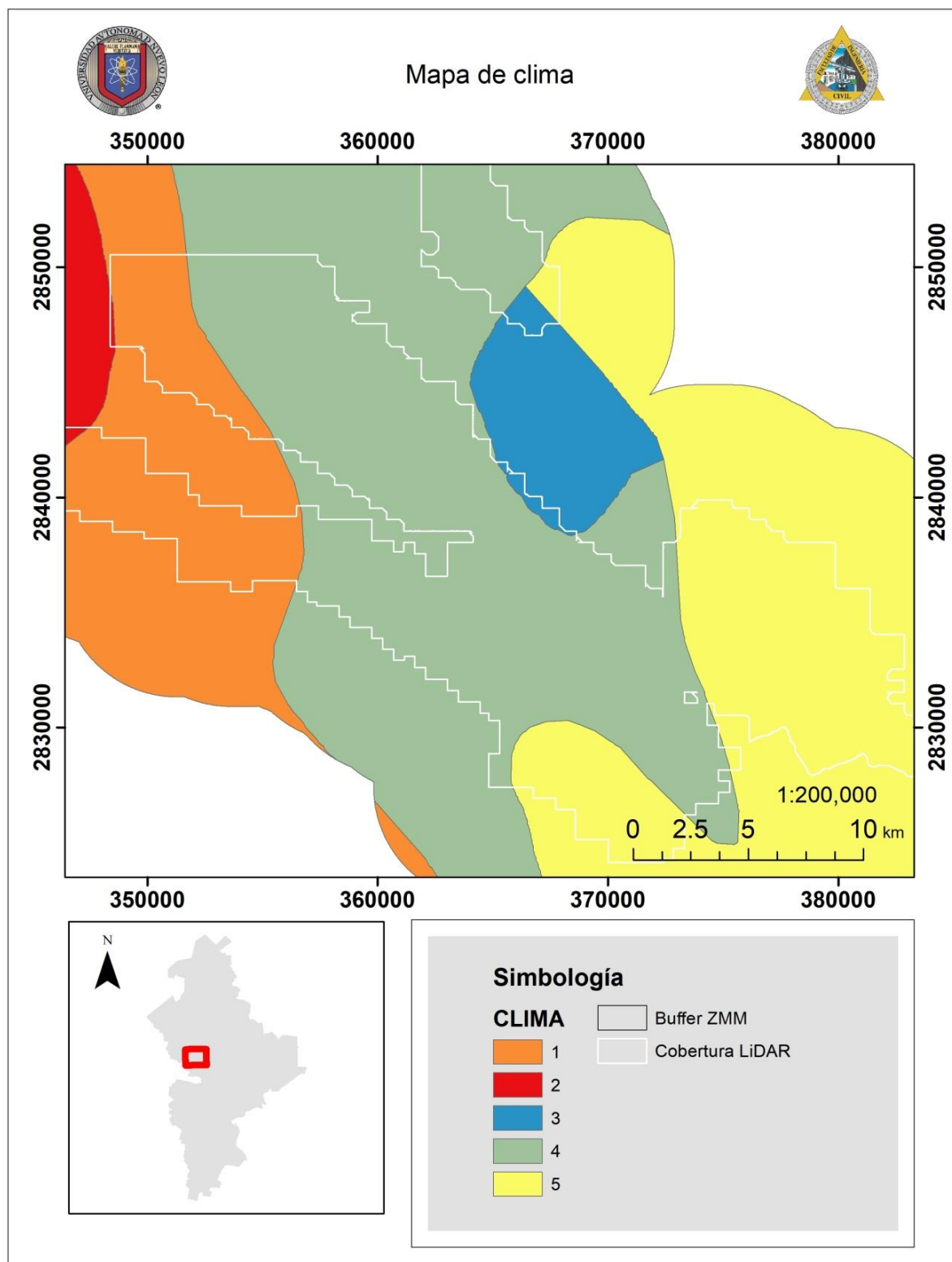


Figura 10. Mapa con los diferentes tipos de clima presentes en la zona de estudio con datos de INEGI.

Relieve

En la Figura 11, se muestran las provincias fisiográficas registradas en el nivel nacional, propuesto por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad escala 1:4000000 (Cervantes Zamora, CornejoOlgín, Lucero Márquez, Espinoza Rodríguez, E., & Pineda Velázquez, 1990). En esta imagen se muestra la localización del área de estudio como una estrella amarilla, posicionándose sobre el territorio de la Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Norte. El acercamiento al área específica de estudio se puede observar en la Figura 12. Las subprovincias fisiográficas mostrada en la Figura 13 muestran como el área estudio varía entre sierras y llanuras a lomeríos y llanuras.

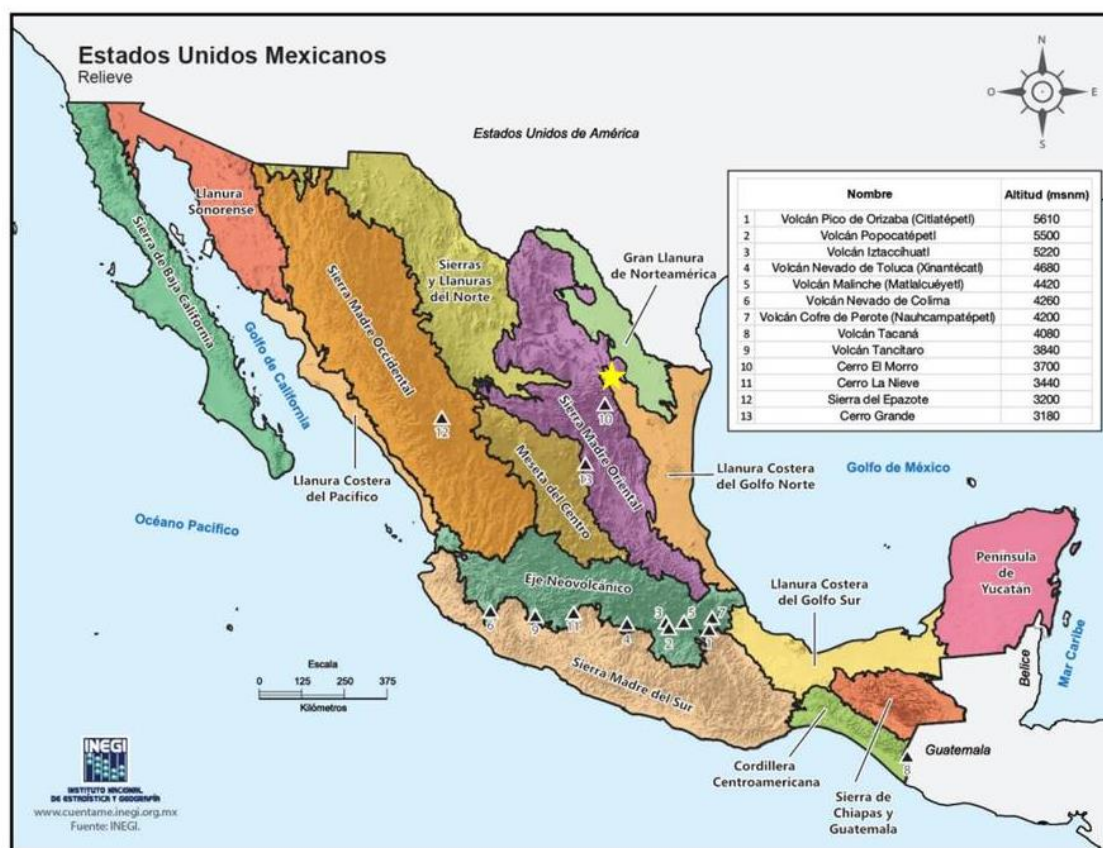


Figura 11. Mapa de relieve del INEGI. La estrella amarilla es el punto de localización del área de estudio.

2. Marco teórico

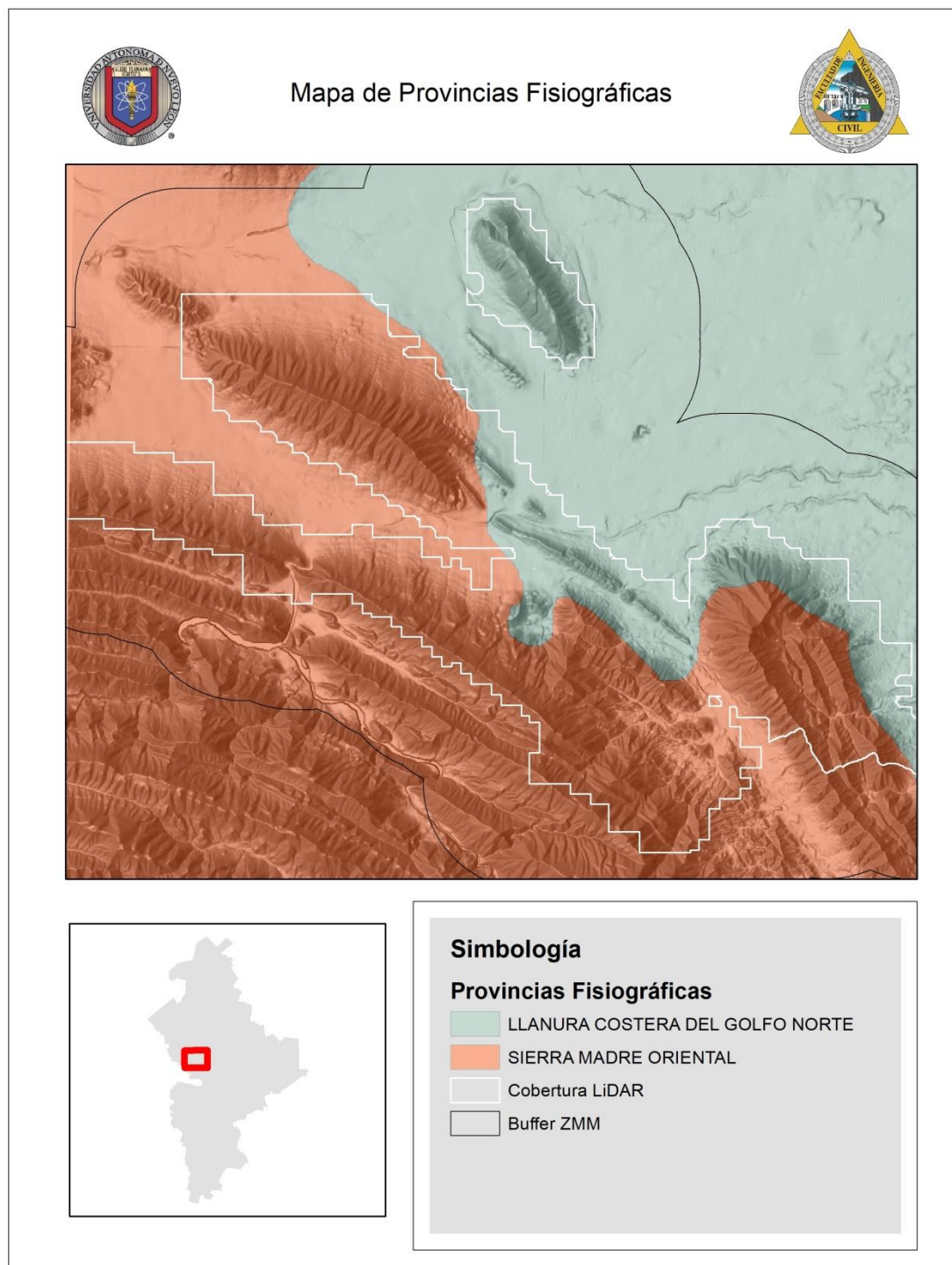


Figura 12. Mapa de provincias fisiográficas con datos del INEGI (Elaboración propia).

2. Marco teórico

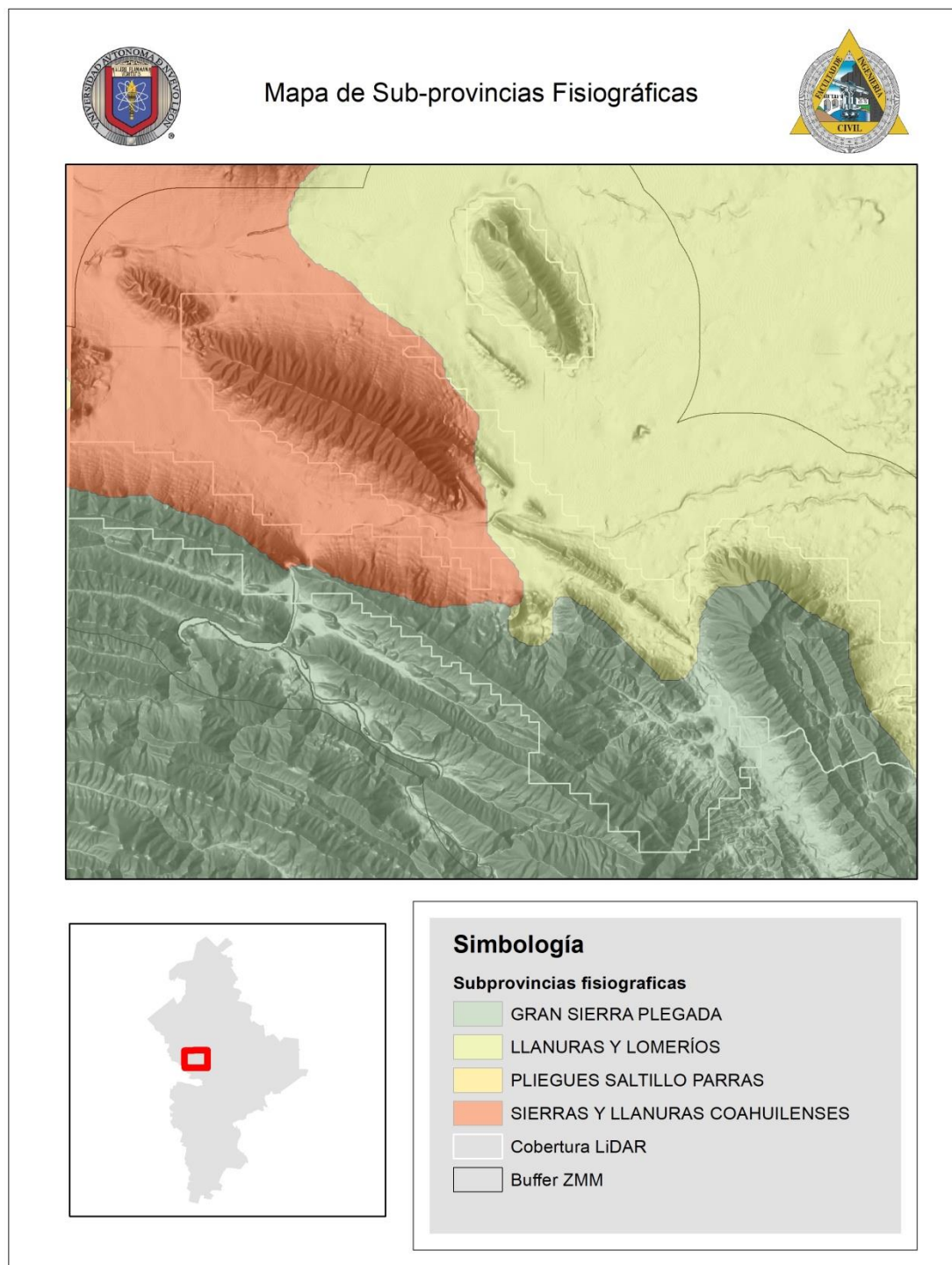


Figura 13. Mapa de subprovincias fisiográficas con datos del INEGI (Ramírez, 2019).







Uso del suelo y vegetación

En cuestión de inestabilidad de laderas, un componente principal importante dentro de los factores que condicionan el medio natural es la cobertura y uso del suelo. Los mapas que abarcan este tema se han implementado desde 1978, siendo provistos por INEGI. La última generación de esta información corresponde a la serie VI en la que se describen 12 ecosistemas vegetales, 58 tipos de vegetación para todo el país, registrando que el 48.5% de la superficie del país está cubierta con vegetación primaria (es decir, vegetación que no ha sido modificada por actividades humanas o acontecimientos naturales recientes).

La información sobre uso del suelo y la vegetación contiene la distribución de uso del suelo agrícola, agropecuario y de vegetación tanto natural como inducida, así como forestal. Esta información sirve como base para proyectos que competen la planeación urbana y el ordenamiento territorial, planes de manejo de Áreas Naturales Protegidas, políticas agropecuarias, inventario de recursos naturales, y como insumo en la modelación para prevención de efectos por desastres naturales, etc. Esta información se realizó a partir de la interpretación de imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat del año 2014, tomando como base la serie V (ambas de escala 1:250,000) en combinación con recorridos y observaciones de campo. En resumen, se han realizado seis series de esta información: Serie I del año 1985, serie II de 1993, serie III del 2002, IV del 2007, V del 2011 y VI del 2014. La información aquí desplegada es de escala 1:250 000, existe información con escala 1:50,000, pero solo se encuentra disponible en físico y pertenecen a la serie II.

Tabla 7. Información de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 00 (tomado de INEGI, 2015).

2. Marco teórico

	SERIE I	SERIE II	SERIE III	SERIE IV	SERIE V	SERIE VI
Período de Elaboración	1978-1991	1995-2000	2002-2005	2007-2010	2011-2014	2015-2017
Fecha de datos de campo	1978-1990	1996 - 1999	2002-2003	2007-2008	2012-2013	2015
Año de referencia de la información	1985	1993	2002	2007	2011	2014
Escala	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250,000	1:250 000
Imágenes						
Datos	Fotografías Aéreas	Espacio mapas Impresos	LANDSAT TM (30m)	SPOT 5 (10m)	LANDSAT 5 TM (30m)	LANDSAT 8 (30m)
Metodología	Producto Mapa Analógico	Producto Mapa Analógico	Información digital	Información digital	Información digital	Información digital
Información	Analógica	5 capas	14 capas	13 capas	13 capas	15 capas

El área de estudio corresponde a las características de una zona urbanizada, se reporta aproximadamente el 50 % de cobertura por matorral (estructura vegetal media) seguido por el 36% de cobertura urbanística. La mayor parte de la cobertura vegetal media se encuentra localizada en la falda de las montañas, sitios que aún no han sido urbanizados. Estos resultados se obtuvieron tomando en cuenta el área de influencia de 5 km alrededor de la disponibilidad de datos LIDAR considerado para el presente proyecto.

2. Marco teórico

Tabla 8. Descripción y coberturas de tipos de uso de suelo para el área de influencia correspondientes a la capa de Uso de Suelo y Vegetación serie V de INEGI, calculado para el presente estudio.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	ÁREAS (km ²)	PORCENTAJE DE COBERTURA
AH	ASENTAMIENTOS HUMANOS	147.17	10.84
BP	BOSQUE DE PINO	9.97	0.73
BQ	BOSQUE DE ENCINO	88.69	6.54
BQP	BOSQUE DE ENCINO-PINO	29.76	2.19
DV	SIN VEGETACIÓN APARENTE	7.88	0.58
H2O	CUERPO DE AGUA	0.23	0.02
MDM	MATORRAL DESERTICO MICROFILO	21.06	1.55
MDR	MATORRAL DESERTICO ROSETOFILO	152.86	11.26
MSM	MATORRAL SUBMONTANO	365.26	26.91
PC	PASTIZAL CULTIVADO	3.91	0.29
PI	PASTIZAL INDUCIDO	16.08	1.19
RA	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	4.64	0.34
TA	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	20.01	1.47
VSa/BP	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO	19.44	1.43
VSa/BQP	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO	5.28	0.39
VSa/MDM	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESERTICO MICROFILO	9.46	0.70
VSa/MSM	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO	104.60	7.71
ZU	ZONA URBANA	350.79	25.85

2. Marco teórico

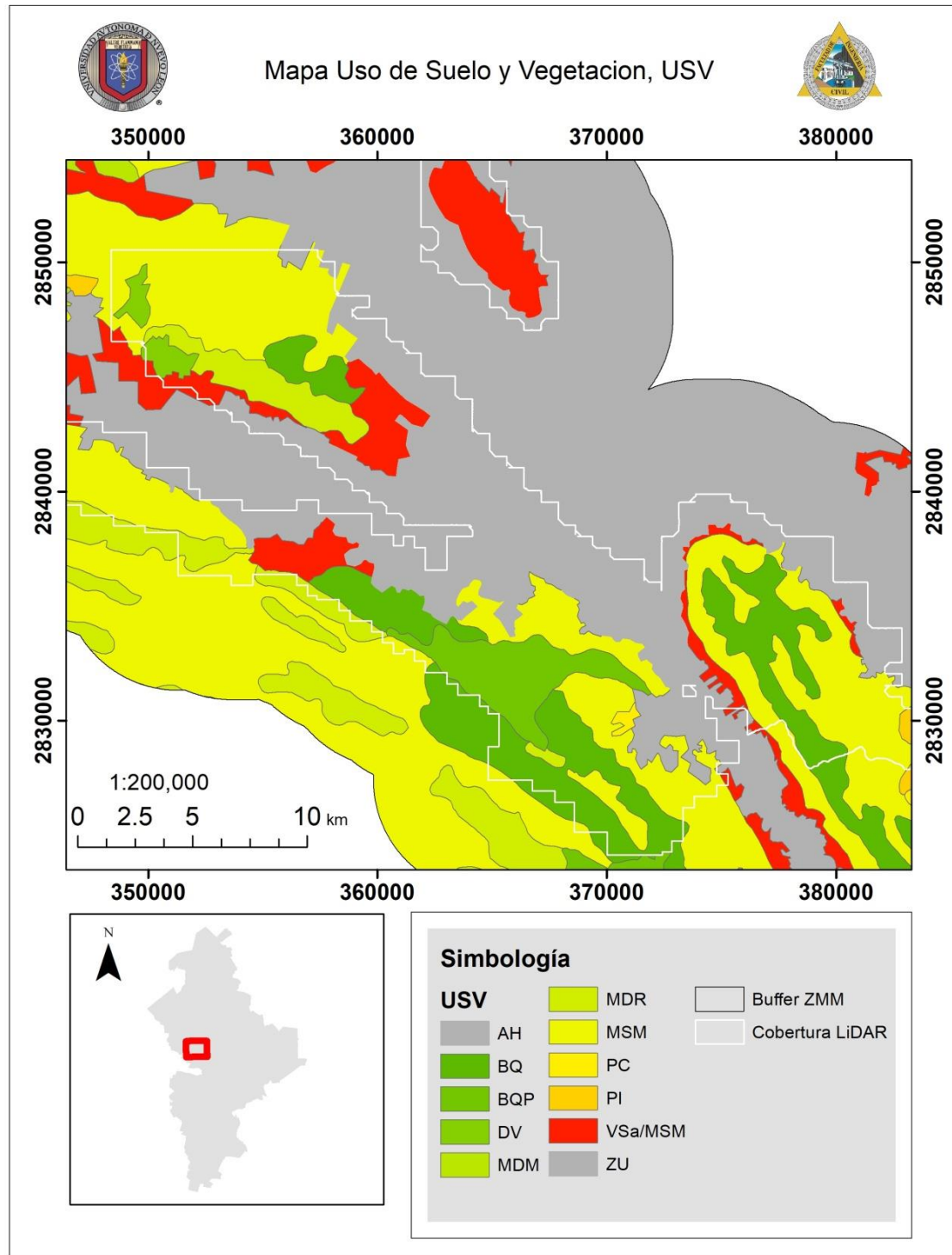


Figura 14. Uso de suelo y vegetación para el área de estudio con datos de INEGI, Uso de Suelo y Vegetación serie V.

Inventario de deslizamientos

Importancia de la información histórica

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en el futuro, es necesario el estudio histórico de este fenómeno sobre el área de interés (Steger, Brenning, Bell, & Glade, 2017) bajo el principio “El presente y el pasado son la clave del futuro” (Varnes, 1984). Aunque, en la mayoría de los casos, los mapas regionales de predicción de deslizamientos, carecen de estudios históricos que avalen y comparen los resultados obtenidos, con el comportamiento real de la zona (Wills & McCrink, 2002). Una manera de solventar los modelos de predicción son los inventarios de deslizamientos de laderas, los cuales, compilan los eventos ocurridos en el sitio para un tiempo determinado, basándose en las marcas de desgaje del terreno y la superficie en donde se depositó el material desplazado (Malamud, Turcotte, Guzzetti, & Reichenbach, 2004).

Métodos para inventariar deslizamientos

Los inventarios, pueden realizarse de forma directa en el campo, con información recabada por institutos gubernamentales; sin embargo, muchas veces no es posible aplicar este tipo de métodos porque no se cuenta con el tiempo, los recursos económicos o no se tiene la información para un área determinada. Existen también, métodos indirectos, utilizando sensores remotos. Los métodos indirectos, pueden realizarse de manera manual, comparando dos imágenes de diferentes tiempos, para detectar zonas en donde se reporten cambios en el relieve, como escarpes pronunciados, montículos en la zona del valle, así como pérdidas repentinas de vegetación, detectados por cambios de textura y de tono en la firma fotográfica (término implementado para referirse a cambios visuales de coloración en imágenes RGB aéreas; (Li, Shi, Lu, Yan, Wang, & Miao, 2016; Niculiță, Mărgărint, & Santangelo, 2016).

Por otro lado, la información topográfica digital obtenida de los Modelos de Elevación Digital (MDE) permite elaborar técnicas semiautomatizadas con base en los cambios morfológicos del terreno, ya sea, a través de las conexiones entre curvas de nivel, como lo propuesto por Leshchinsky, Olsen, & Tanyu (2015), en donde se propone el Método automatizado de Conexión de Contornos (CCM, Contour Connection Method), el cual fue posteriormente modificado por Gaidzik, Ramírez Herrera, Bunn, Leshchinsky, Olsen, & Regmi (2017), o utilizando esta información en combinación con información multi-espectral, como el método CDMRF (Campos aleatorios de detección basados en cambios de Markov), propuesto por Li, Shi, Myint, Lu, & Wang (2016).

Antecedentes de deslizamientos en el sitio

2. Marco teórico

Aunque en la ZMM se han identificado algunas zonas riesgosas para la población por presentar derrumbes de laderas, la ciudad continúa creciendo dentro de ellas. Algunos ejemplos de estas zonas son: el cerro de las Mitras, el cerro del Topo Chico, cerro de la Silla, el cerro de la Loma Larga, el Cañón del Huajuco, el cerro del Mirador, la Meseta de Chipinque (Cantú Silva, 2012) o Cerro de La Corona. Durante el inicio del proyecto, en el año 2015, se presentaron dos eventos (el último en febrero del 2015) en el Cerro de la Corona, los cuales sucedieron en áreas de pendientes mayores que 40° y que presentan edificación, infraestructura y equipamiento dañados. Solo dos familias han sido desalojadas de la colonia Cerro de la Corona por Protección Civil, pero se desconoce si se está realizando la evaluación de los daños. Es por lo anterior que el mapeo y la delimitación de áreas susceptibles a derrumbes es esencial para las actividades de uso de suelo, el manejo y la toma de decisiones en áreas montañosas (Dai & Lee, 2002). El enfoque geoespacial, para el modelado SIG, superpone parámetros físicos con base en la influencia que éstos tienen en el incremento de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y los proyecta a distintas escalas (Van Westen, 2000).

En el año 2005 se reportaron deslizamientos en el Club Alpino Chipinque, ocasionados por la desestabilización del talud por el corte de pista del Deportivo Alpino. Por otro lado, el 18 de febrero del 2015 se reportó un derrumbe ocurrido en la calle "Cerro de Picachos" ubicada en el Cerro de La Corona, donde el deslave destruyó el muro de contención, afectando a vecinos del lugar. Un mes después (11 de marzo del 2015), producto de lluvias prolongadas, sucedió otro deslave en esa zona, ocasionando la caída del talud junto con postes de luz y de telefonía. En 2012 el Departamento de Geohidrología y Geofísica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) realizó un estudio con técnicas de Georadar (SIR-3000), con la finalidad de determinar e identificar zonas cársticas en predios en el Cerro de La Corona, aconsejando el control de estas cavidades mediante la aplicación de técnicas de construcción con base en pilotes (Rodríguez, Valero, Navarro, & Bermúdez., consultado en 2018).

Ambos muestran la afectación de los fenómenos de remoción en masa, en municipios como: San Nicolás de los Garza donde se exhiben problemas por volteo y deslizamientos en el flanco sureste del Cerro del Topo Chico, General Escobedo que presenta zonas de derrumbes por volteos y deslizamientos en la porción flanco sureste de Los Potreros y al noreste de la Sierra de las Mitras. En García donde existen desarrollos habitacionales cercanos a la Sierra El Fraile y la Sierra de las Mitras y donde las corrientes provenientes de cañadas de la sierra y el arrastre de rocas y piedras ponen en peligro a la población. Santa Catarina presenta volteos y deslizamientos frecuentes en el flanco suroeste de Las Mitras y al sur en la Autopista Monterrey-Salttillo. Así también San Pedro Garza García presenta deslaves en áreas residenciales en el Cerro de la Corona; Guadalupe, Monterrey y Santiago donde se observan deslizamientos y caídos en el Cerro de la Silla y Cañón del Huajuco.

3 MÉTODO

El método principal se basa en la valoración del modelado SIG para zonificar la probabilidad de susceptibilidad por inestabilidad de laderas, bajo tres escalas de estudio, siendo el factor topográfico (Modelo Digital de Elevación, MDE) el insumo de mayor interés. Las escalas de trabajo están definidas por los insumos utilizados, los cuales corresponden a 1:250000, escala gruesa, 1:50000, escala media, y 1:5000, escala local. Utilizando como insumos el MDE-INEGI de 5 m para la escala gruesa, junto con la información proporcionada por las instituciones gubernamentales correspondiente, tal como se especifica en el apartado de Insumos. La escala media se compone de la obtención propia de la información, tomando como base un MDE-LIDAR de 1m y una imagen SENTINEL 2, acceso libre, de 10m de resolución. La escala local se compone de un MDE obtenido por UAV, también conocidos como VANT o dron multi-rotor, re-muestreado a 10 cm, junto con la ortofoto digital correspondiente al mismo vuelo. Para obtener esta última información se requirió de visitas al campo, donde se realizaron los muestreos, así como la experimentación previa, que permitió estandarizar la toma de los datos y el nivel de precisión que podría ser esperado.

Por otro lado, se realizó un algoritmo de detección automatizada de posibles deslizamientos históricos, como parte de la aportación de este proyecto, el cual fue validado por su comparación con métodos tradicionales y un algoritmo alternativo de detección de deslizamientos. Los modelos de susceptibilidad son validados con el porcentaje de traslape de las categorías de mayor susceptibilidad con las zonas que fueron previamente identificadas como zonas de probable ocurrencia de deslizamientos.

En las siguientes secciones se desglosa el método implementado para obtener lo antes descrito, en la Figura 15 se describe de manera grafica el diagrama de flujo del proyecto.

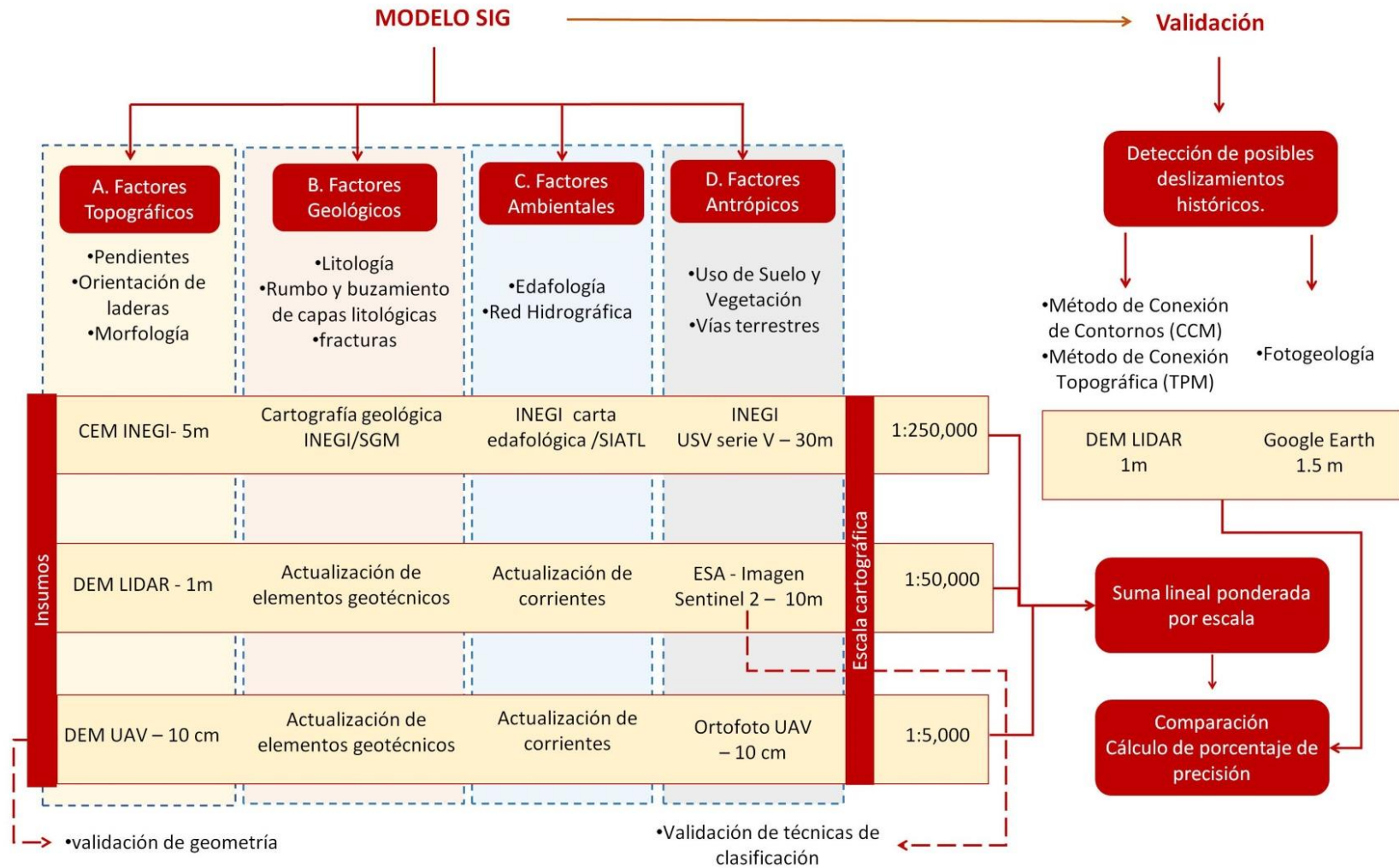


Figura 15. Diagrama de flujo general del proyecto.

3. Método

3.1 Insumos

La información utilizada como base de la modelación de este proyecto se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Insumos utilizados para el presente proyecto.

Insumos	Especificaciones
MDE, de alta resolución	MDE proveniente de vuelo LIDAR, 1m de resolución, 2010. El equipo de levantamiento topográfico aéreo consistió en un avión 402 C Twin Engine Aircraft w/ integrated systems (N4661N) el cual contaba con un Airborne Laser Scanner Leica ALS 50 de Fase II) con Micro IRS Inertial Measurement Unit (IMU) – (unidad de medida inercial).
MDE, INEGI	El Modelo Digital de Elevación (MDE) utilizado para este estudio, cuenta con una resolución de 5 x 5 m obtenido a partir del procesado de un levantamiento LIDAR aéreo, proporcionado por INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía)
Imagen Satelital	Imagen satelital del sensor Sentinel 2, de 10m de resolución, capturada el 20 de enero de 2018.
Capas vectoriales de INEGI	Carta geológica 1:50000, Uso de suelo y vegetación 1:250000 (Serie V).
Capas vectoriales SGM	Carta geológica minera 1:50000.
Revisión manual histórica	A través de la plataforma de Google Earth, el cual cuenta con una combinación de imágenes satelitales, en color real, que van desde el uso de imágenes Landsat, complementadas con imágenes de alta resolución como DigitalGlobe™ (www.digitalglobe.com), GeoEye™ (www.geoeye.com), and SPOT™ (www.spot.com) (Jones, 2008). Las imágenes adquieren una componente 3D tomado de los datasets tipo ráster provenientes de Landsat que van de 30 a 90 m de resolución (Farr et al., 2007; Fisher, 2012). Particularmente, el área de estudio cuenta con un archivo de imágenes SPOT de 1.5m de resolución (http://www.spotimage.com/spotmaps/). El intervalo histórico disponible de imágenes, para la zona, es de 2005 a 2017.

Equipo

Para el presente estudio se utilizó como medio de procesamiento básico, así como estadística y redacción, un equipo de cómputo personal estilo laptop, marca TOSHIBA, modelo Satellite L55-C, con procesador Intel® Core™ i5-5200U, con memoria RAM de 6GB.

Como medio alternativo necesario para procesamiento avanzados, se utilizó equipo de cómputo mejorado, estilo escritorio, con procesador AMD Ryzen Threadripper 1950X 16- Core Processor 3.40 GHz, Memoria RAM de 64 GB, Sistema operativo de 64 bits, procesador x64, perteneciente al Laboratorio de Geomática, UANL.

3. Método

3.2 Modelo SIG

El modelo metodológico implementado para calcular la susceptibilidad por inestabilidad de laderas basa su proceso en técnicas multi-criterio, en la que se consideran los elementos entre naturales y antrópicos, de las que depende la estabilidad natural del terreno para mantenerse estable. Tales factores se segregan entre:

- A. Factores topográficos
- B. Factores geológicos
- C. Factores ambientales
- D. Y Factores antrópicos

Estos factores se procesan dentro de una suma lineal ponderada con base en la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde r_i es el nivel de adecuación de la alternativa i ; w_j es el peso del criterio j , v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio j . Es decir, es la suma del valor categorizado de cada criterio multiplicado por el peso relativo asignado, lo cual se podría adaptar de la siguiente manera:

$$S = w_A v_{iA} + w_B v_{iB} + w_C v_{iC} + w_D v_{iD} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde S es la susceptibilidad por inestabilidad de laderas, A corresponde a los factores topográficos, B a los factores geológicos, C a los factores ambientales y D a los factores antrópicos.

3. Método

A. Factores topográficos

El único insumo utilizado en este factor corresponde al MDE, el cual fue procesado y posteriormente reclasificado para ser integrado en el modelo. Para este proyecto se utilizan diferentes escalas de trabajo. Por parte de la información de acceso libre gubernamental, se contó con el Continuo de Elevación Mexicano (CEM) proveniente de INEGI de 5 m de resolución.

También se implementó un MDE de 1m de resolución. Después de que el Huracán Alex causara estragos en la ZMM, se realizó un vuelo LIDAR con una avioneta, tomando puntos cada 70 cm de distancia; es decir, 4 puntos por metro cuadrado, para evaluar los cambios de antes y después. Esta nube de puntos fue clasificada y filtrada para eliminar ruido, y objetos antropogénicos como edificios, vegetación urbana, automóviles, etc. de tal manera que sólo quedaron los puntos correspondientes al suelo.

Pendientes

El cálculo de la pendiente se basa en el análisis del máximo cambio de elevación entre una celda central con ocho celdas vecinas, en un arreglo de 3 x 3 celdas considerando la celda central. La ecuación que rige el cálculo del grado de pendiente está dado por la siguiente ecuación (Burrough & McDonell, 1998):

$$\phi = \tan \left(\sqrt{\left(\left[\frac{dz}{dx} \right]^2 + \left[\frac{dz}{dy} \right]^2 \right) * \frac{180}{\pi}} \right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Esta ecuación sirve para calcular la tasa de cambio (delta) entre la celda central y cada una de las celdas vecinas, en dirección horizontal o x (dz/dx) y vertical o y (dz/dy), en donde la celda central adquiere el valor delta más alto. El resultado entra en un intervalo de 0 a 90, donde el valor más bajo simboliza un terreno más plano y un valor más alto representa un terreno más inclinado. Si alguno de los valores, dentro del arreglo de 3x3 celdas, no contiene un valor, entonces no se asigna valor a la celda central, por lo que el área de estudio pierde al menos tres celdas en sus bordes.

Orientación de las laderas

El cálculo de este factor se obtiene a partir del valor de cada una de las celdas presentes en el modelo de elevación utilizado como insumo. El valor registrado en el dataset obtenido corresponde a la orientación con respecto al norte geográfico al que apunta la pendiente de esa misma celda, tomando como base un área de influencia de 3x3 celdas alrededor de la casilla central (Burrough & McDonell, 1998).

3. Método

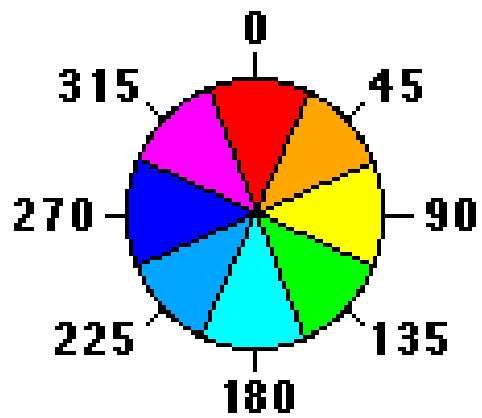


Figura 16. Dirección acimutal de orientación, considerando que el valor 0 apunta al norte geográfico de la Tierra. Tomado de Burrough & McDonell (1998).

Tabla 10. Clasificación de orientación de las laderas por el método de de Burrough & McDonell (1998).

Azimut	Orientación
-1	Plano
0 - 22.5	Norte
22.5 - 67.5	Noreste
67.5 - 112.5	Este
112.5 - 157.5	Sureste
157.5 - 202.5	Sureste
202.5 - 247.5	Suroeste
247.5 - 292.5	Oeste
292.5 - 337.5	Noroeste
337.5 - 360	Norte

3. Método

Reclasificación de pendientes y orientación.

Una vez obtenidos los insumos, éstos fueron reclasificados para ser integrados dentro del modelo.

Tabla 11. Reclasificación de factores topográficos.

FACTORES TOPOGRAFICOS		
Factor	Intervalos	Categorías
Pendientes	>45°	5
	35-45°	4
	25-35°	3
	15-25°	2
	< 15°	1

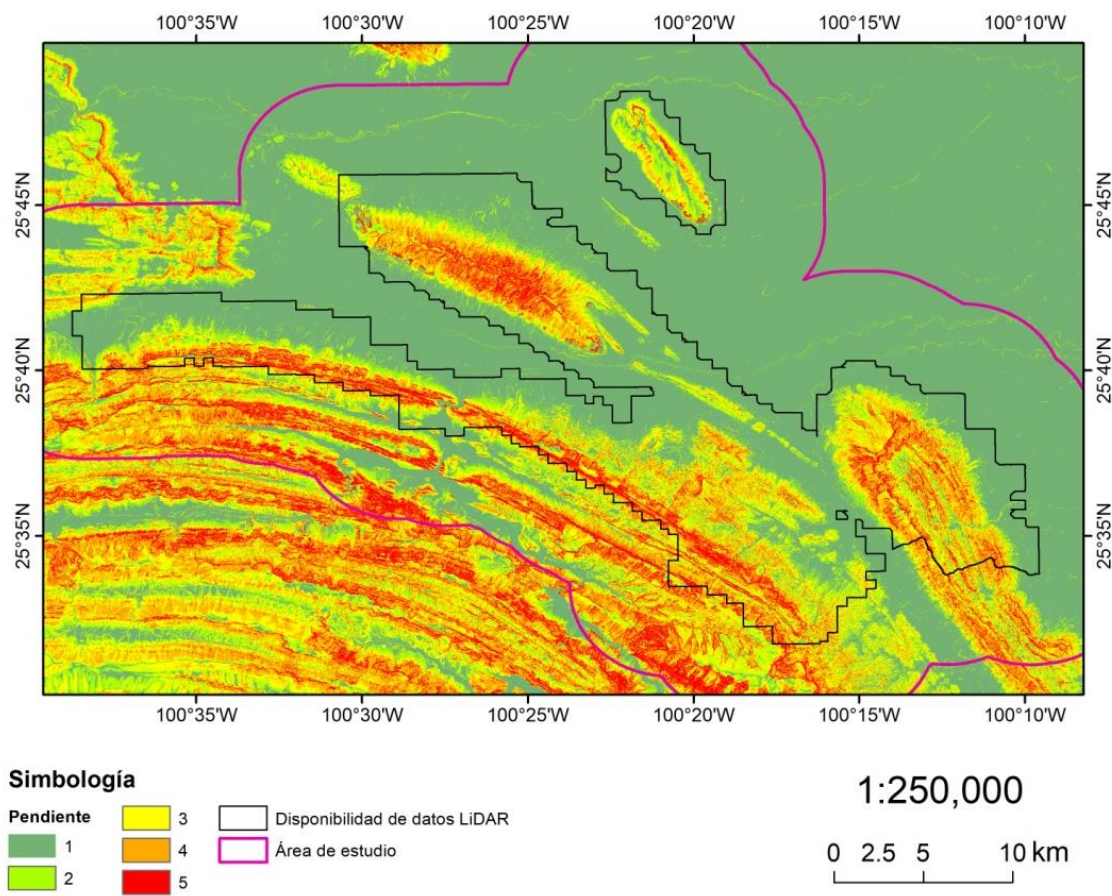


Figura 17. Re-categorización de la información con respecto al método planteado, insumo CEM-INEGI de 5m.

3. Método

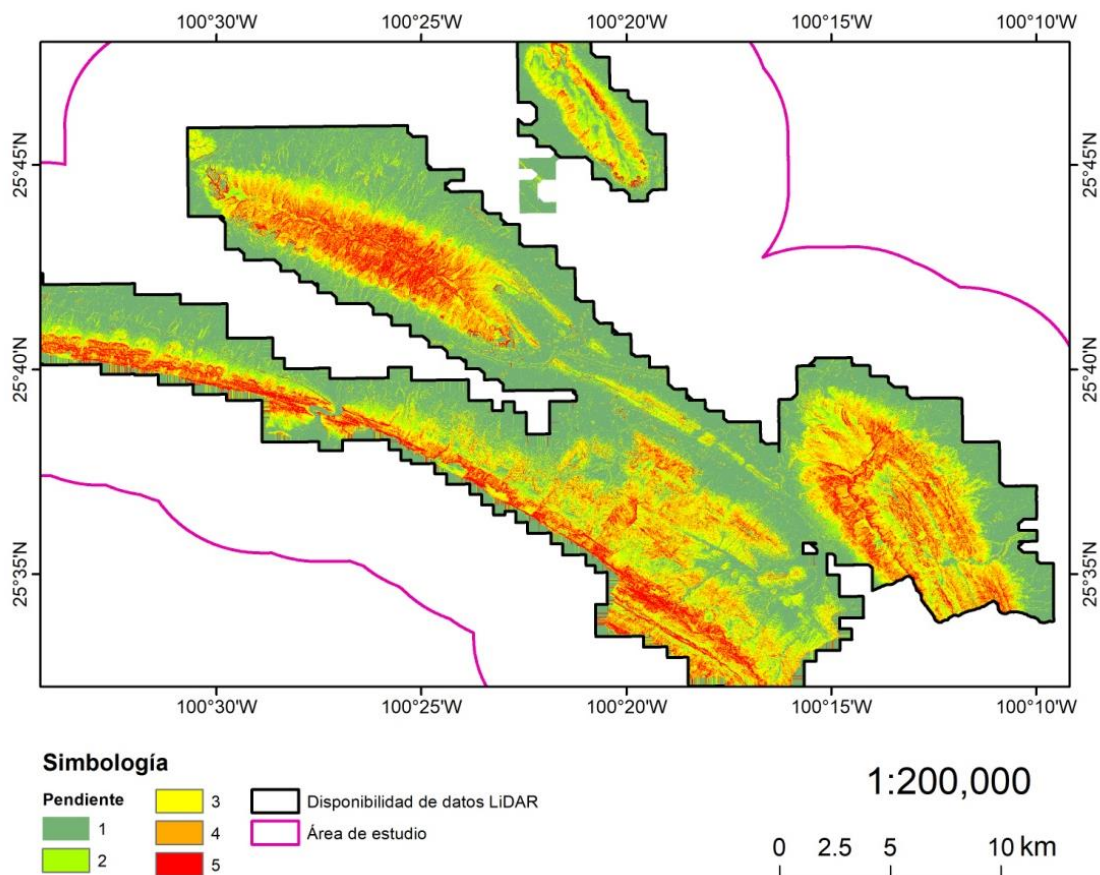


Figura 18. Re-categorización de la información con respecto al método planteado, insumo MDE-LIDAR de 1m.

Geomorfología

Este concepto está relacionado con la caracterización del terreno con respecto a la forma de la superficie terrestre, y puede agruparse conforme a la similitud de características altimétricas como mesetas, cañones, llanuras, etc. Este comportamiento está ligado al Índice de posición topográfico (TPI) el cual clasifica el paisaje mediante la diferencia de elevación entre píxeles y la agrupación de los píxeles vecinos por el promedio obtenido de esta diferencia de elevación. Valores positivos resultan de celdas que son más altas que sus vecinas; al contrario, valores negativos representan depresiones del terreno (Figura 19). Dependiendo de los grados de pendiente, de manera escalada, se puede designar una categoría: valores altos se refieren a crestas de montaña, valores medios a llanuras o tierras planas, y valores bajos al fondo de un cañón (Jenness, 2006). La aplicación de esta clasificación resultó en 10 clases que posteriormente fueron reclasificadas para integrarse en el modelo SIG (Tabla 12). La capa resultante se muestra en la Figura 20 para el MDE de 5m y Figura 21 para el MDE de 1m. Este método ha servido como herramienta en el análisis de cambios en el

3. Método

paisaje. Se ha utilizado para definir cambios por glaciaciones (Zasadni & Kłapyta, 2014) hasta análisis más complejos de cambios en el comportamiento animal debido a la evolución del paisaje (Coulon, Morellet, Goulard, Cargnelutti, Angibault, & Hewison, 2008).

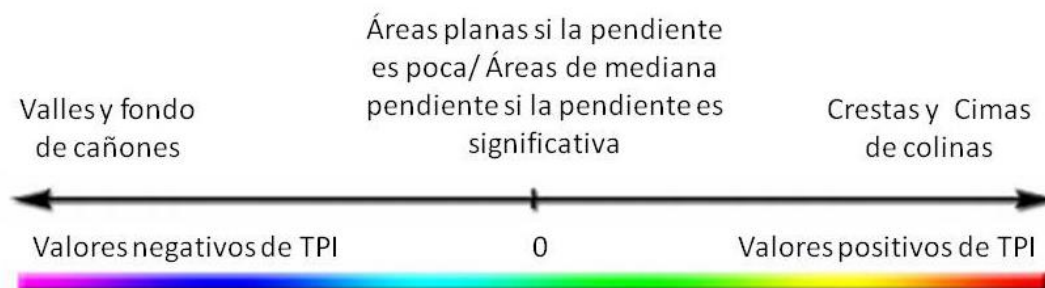


Figura 19. Representación de la clasificación de paisaje por la técnica de Jennes, TPI (Jenness, 2006).

Tabla 12. Reclasificación de categorías de morfología por la técnica de Jennes, para usar dentro del Modelo SIG (Jenness, 2006).

Geomorfología (Jennes)	Re-clasificación	Descripción
1	5	Cañones, cárcavas
2	4	Drenaje en la mediación de montañas
3	5	Drenaje en la cima de la montaña
4	3	Valles cerrados
5	0	Terreno de poca pendiente (llanura)
6	4	Pendientes abiertas
7	3	Mesetas
8	3	Cresta en valles
9	4	Colinas en planos
10	5	Cima de la montaña

3. Método

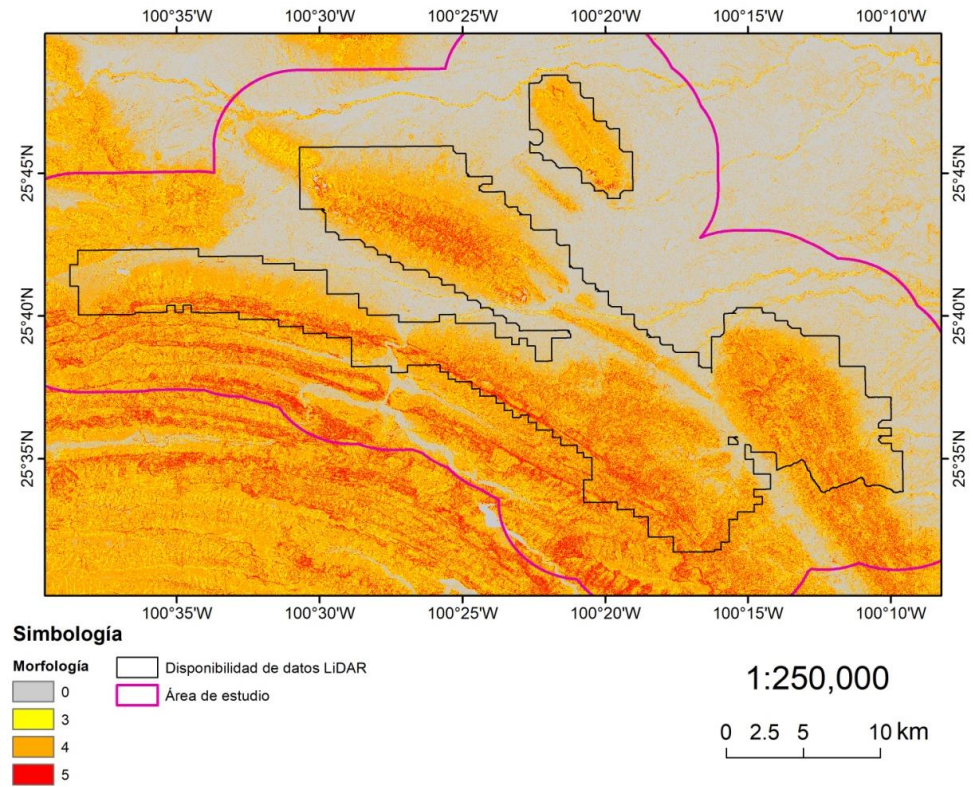


Figura 20. Mapa morfológico reclasificado, basado en CEM-INEGI de 5m.

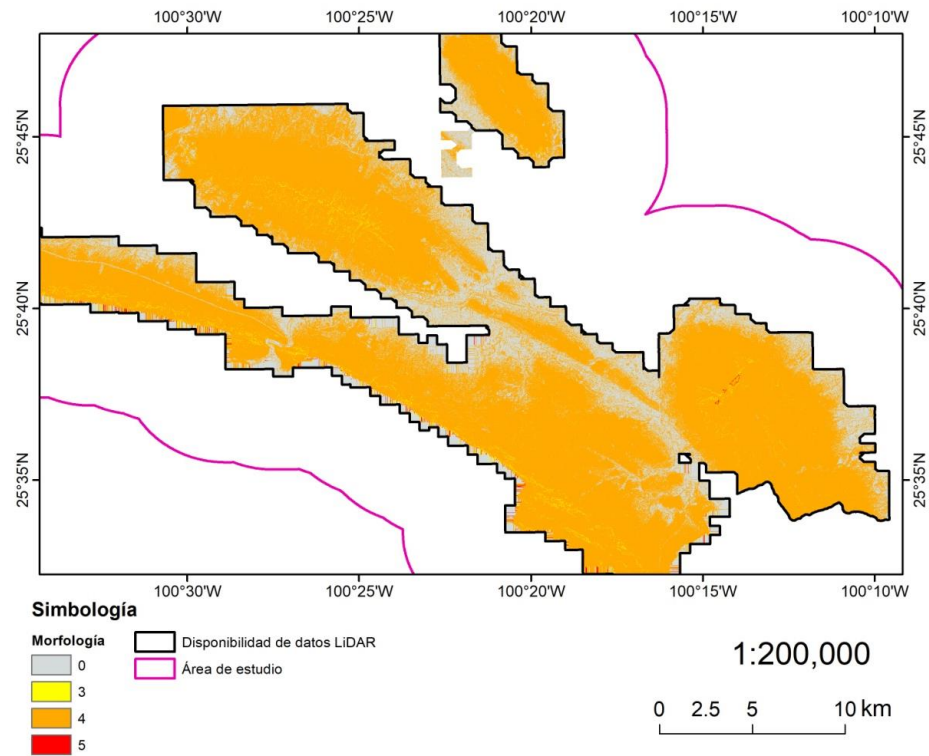


Figura 21. Mapa morfológico reclasificado, basado en MDE-LIDAR de 1m.

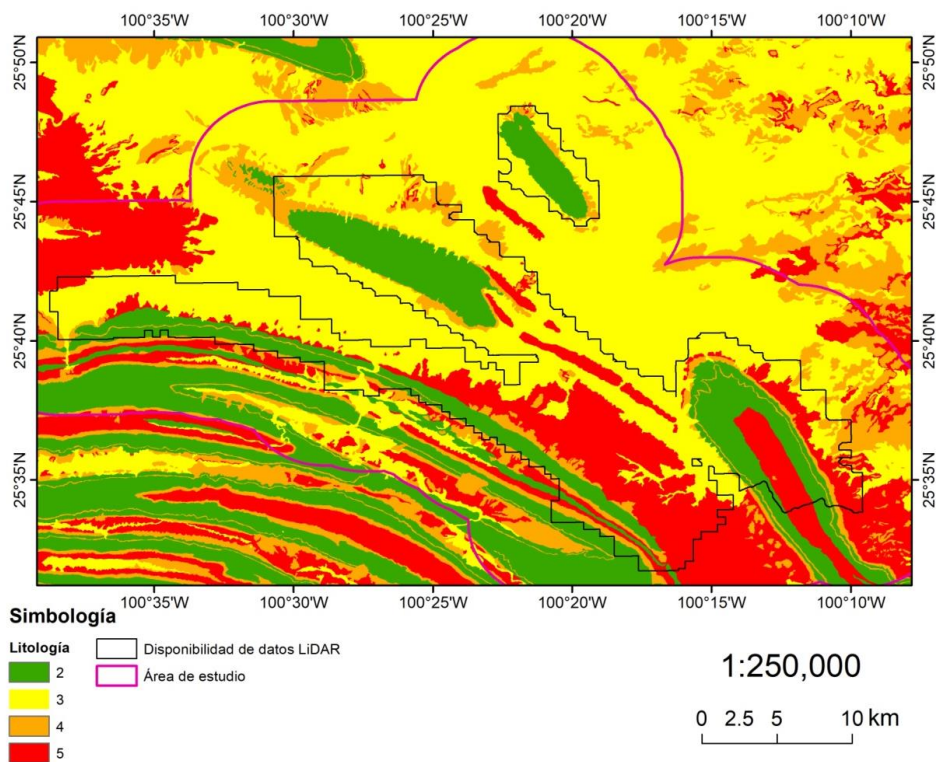
3. Método

B. Factores geológicos

Litología

Para la capa de información geológica se tomaron en cuenta tres variables: la litología (tipos de roca), los lineamientos (fallas y fracturas a gran escala) y datos estructurales sobre el echado rumbo y buzamiento de las capas litológicas. Para esto se realizó una fusión entre la digitalización de las cartas físicas del INEGI y se complementó con la información obtenida de las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Analizando desde el punto de vista litológico, se integró en el modelo una capa en la que se categoriza el tipo de roca presente en el sitio, con base en su reacción con respecto a la inestabilidad de una ladera. Para esto, se tabuló el grado de afectación en las siguientes categorías: a) rocas metamórficas, b) rocas ígneas, c) rocas sedimentarias, d) intercalaciones, e) rocas cársticas y f) suelos no consolidados (Figura 22). Desde un punto de vista geotécnico, se determinó el ángulo diferencial de pendientes, que es la relación angular existente entre la pendiente natural del terreno o en su caso la inclinación del talud, con respecto a la inclinación de la discontinuidad principal. Así como del ángulo entre el rumbo de la estratificación y el talud. Con esto, se cubre el análisis del arreglo geométrico de la ladera.



3. Método

Figura 22. Mapa de reclasificación litológica para ser integrada dentro del modelo, con base en mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.

Fracturas

El procesado de estos vectores lineales se realizó considerando un análisis de densidad de fracturamiento (Figura 23). Los insumos utilizados corresponden a una digitalización de las fracturas (registradas a una escala 1:50,000) por parte de INEGI y el SGM.

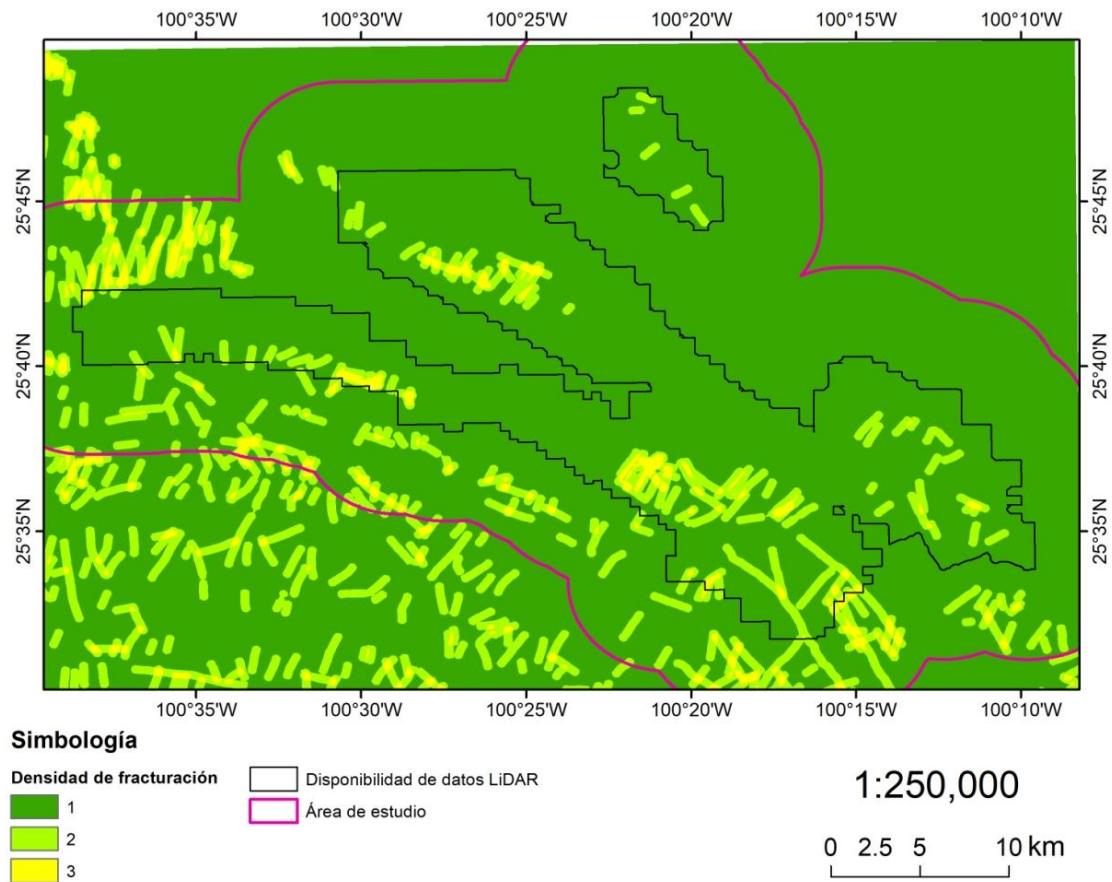


Figura 23. Mapa de reclasificación a partir de un análisis de densidad de fracturas para ser integrada dentro del modelo, con base en el mapa geológico de INEGI y la carta geológico-minera de SGM.

Datos estructurales

Uno de los parámetros importantes para la detección de susceptibilidad por este tipo de fenómeno es la relación que existe entre el echado y rumbo de la capa con respecto al buzamiento (Figura 24 para el MDE de 5m y Figura 26 para el MDE de 1m) y rumbo del corte de la ladera (Figura 25 para el MDE de 5m y Figura 27 para el MDE de

3. Método

1m). Esta relación se entiende como la parte geotécnica del modelo y se rige por la reclasificación presentada en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13. Factores geológicos, ángulos diferenciales de rumbos y buzamientos entre el corte de la ladera y las capas litológicas que la componen.

Angulo diferencial del grado de las discontinuidades y de las pendientes	Falla Plana (-)	Falla por Volteo (+)	
	60-90	60-90	5
	45-60	45-60	4
	30-45	30-45	3
	15-30	15-30	2
	0-15	0-15	1
Angulo diferencial del rumbo de las discontinuidades y el rumbo de talud	Falla Plana (+)	Falla por volteo (-)	
	0-45	0-45	1
	45-90	45-90	2
	90-135	90-135	2
	135-180	135-180	2
	180-225	180-225	1
	225-360	225-360	3

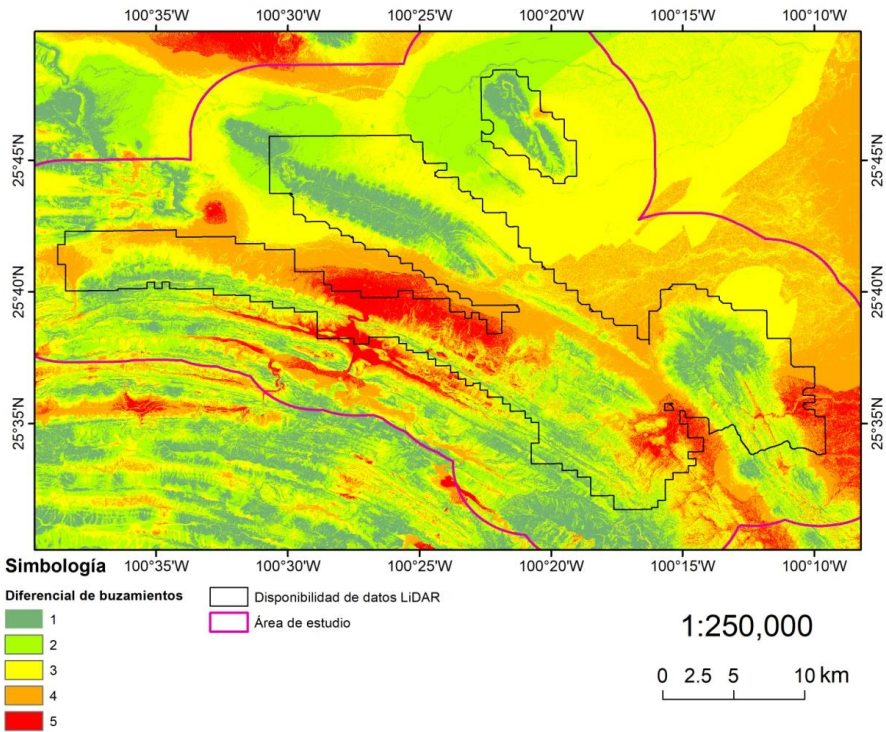


Figura 24. Mapa diferencial de buzamiento, con base en CEM-INEGI de 5 m, mapa geológico del INEGI y la carta geológico-minera de SGM.

3. Método

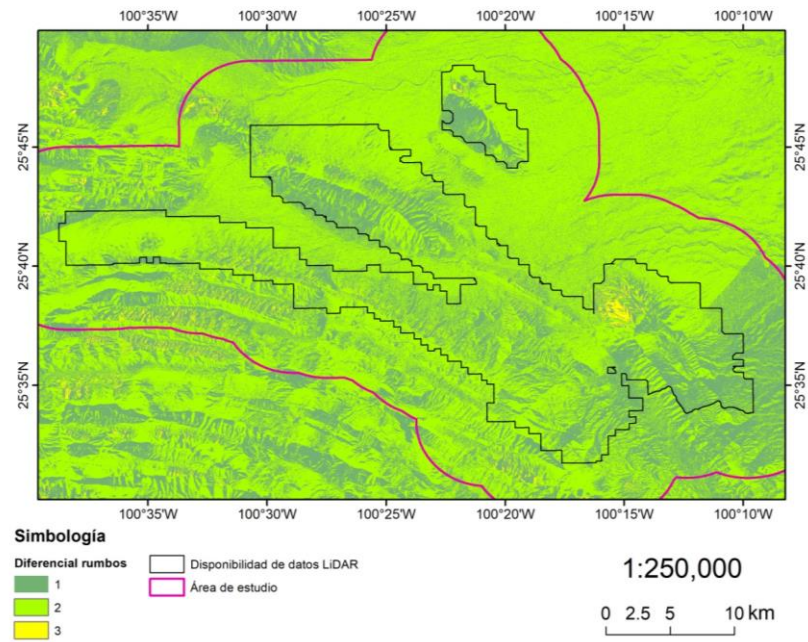


Figura 25. Mapa diferencial de rumbos con base en CEM-INEGI de 5 m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.

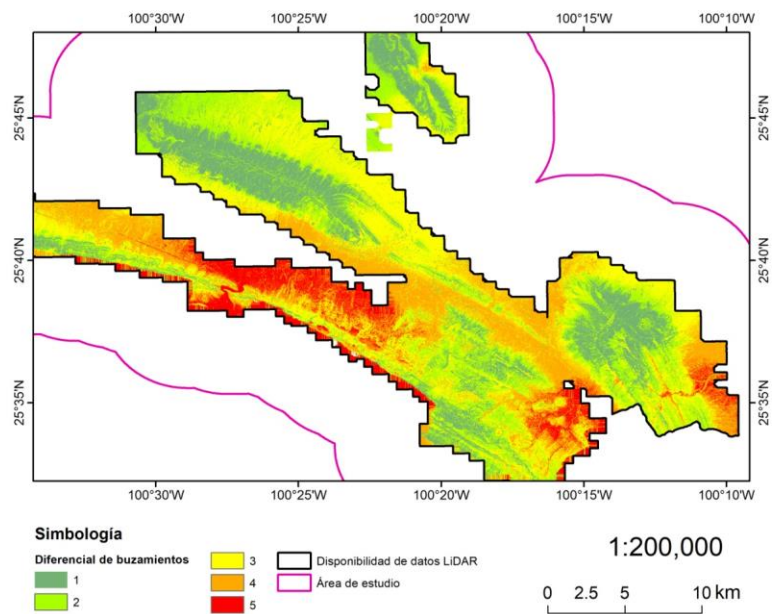


Figura 26. Mapa diferencial de buzamientos con base en MDE-LIDAR de 1m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.

3. Método

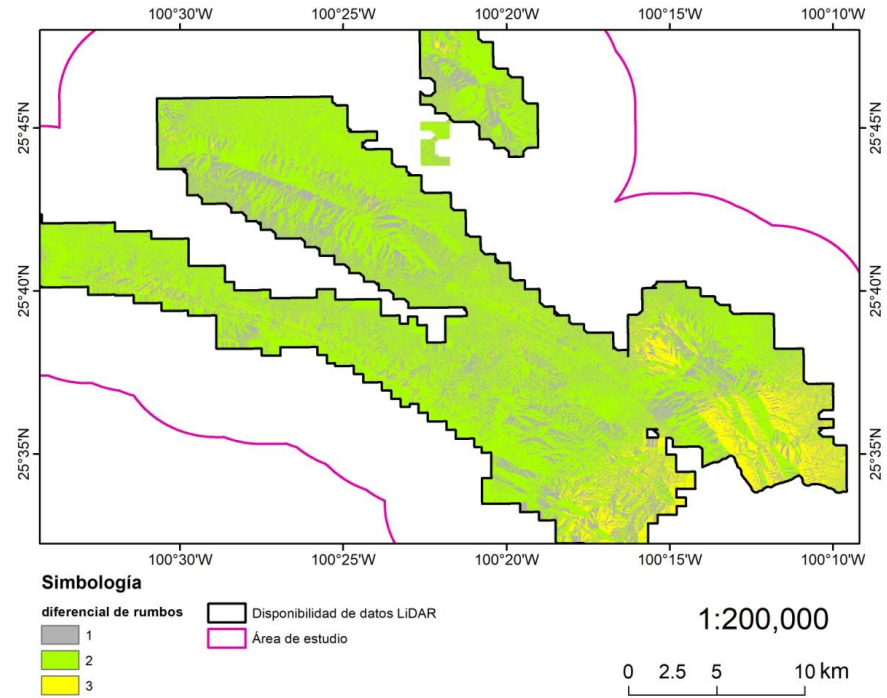


Figura 27. Mapa diferencial de rumbos con base en MDE-LIDAR de 1m, mapa geológico de INEGI y carta geológico-minera de SGM.

3. Método

C. Factores ambientales

Edafología

En el caso de la capa en la que se define el tipo de suelo, se obtuvo a partir de la digitalización de las cartas físicas del INEGI (Figura 28). Se cartografiaron los polígonos correspondientes a la capa de suelos, asignando datos adicionales como: textura, fases físicas y químicas (La categorización final utilizada se muestra en la Tabla 14). Los datos vectoriales se convirtieron posteriormente a formato de celdas (para facilitar los procesos de superposición en el SIG), codificando únicamente los datos de textura.

Tabla 14. Reclasificación del factor edafológico, con base en el mapa edafológico proporcionado por INEGI, escala 1:50,000.

FACTORES TOPOGRAFICOS		
Factor	Intervalos	Categorías
Tipo de suelo	Castanozem haplico y luvico	2
	Litosol	2
	Xerosoles	3
	Yermosoles	3

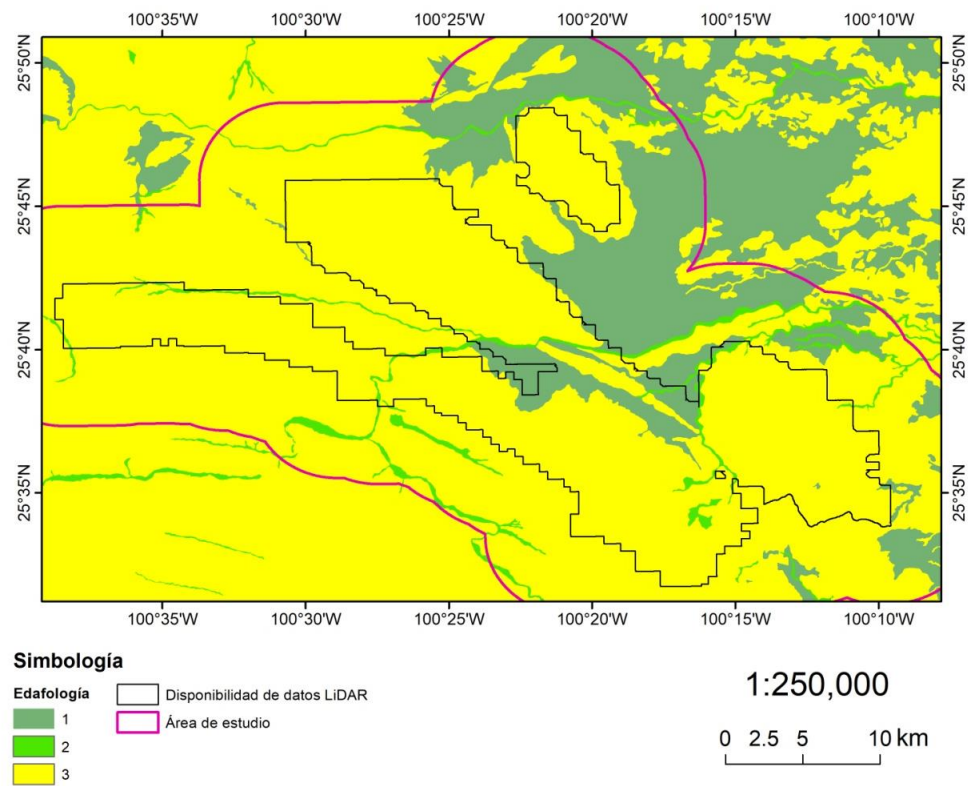


Figura 28. Mapa edafológico reclasificado, con base en el mapa edafológico proporcionado por el INEGI, escala 1:50,000.

3. Método

Red Hidrográfica

La red hidrográfica hace referencia al sistema de circulación lineal de drenaje de una cuenca hidrográfica. Para la obtención de esta información se implementaron dos métodos distintos. Como parte de la integración del Modelo que tiene como base el MDE de 5m, se utilizaron como insumo las escorrentías superficiales presentadas por la plataforma SIATL (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, proveniente del INEGI) escala 1:50,000, de acceso libre. Para respetar la escala del modelo, que es subcontinental, se utilizaron únicamente las escorrentías del orden más alto (Figura 29). Estos datos, a su vez, están basados en información de diferentes resoluciones, como datos vectoriales que definen la línea de costa (1:20,000) y datos topográficos vectoriales escala 1:50,000 (SIATL, 2010).

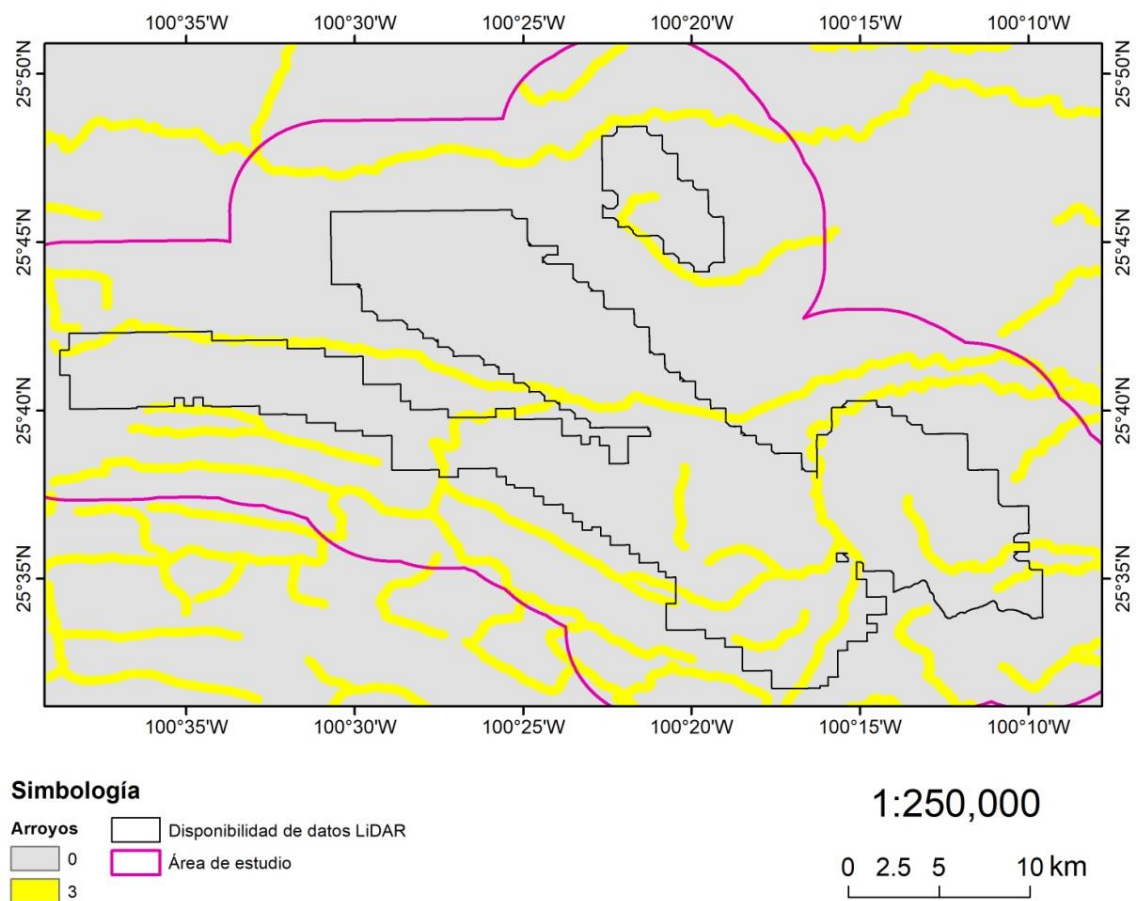


Figura 29. Reclasificación de arroyos con base en información del SIATL utilizado para el modelo de escala 1:250:000.

3. Método

Por otra parte, para definir el modelo que tiene como base el MDE de 1m, se obtuvieron los arroyos de todos los órdenes encontrados (1 a 5 para el área de estudio por el método de Strahler).

El método que se implementó para obtener la red hidrográfica se describe en el diagrama de la Figura 30. Como insumo se utiliza el MDE de 1m, el cual es nivelado para evitar depresiones o elevaciones abruptas que pueden ser resultado del mal filtrado de los datos originales. Sobre el MDE rellenado se calcula la dirección del flujo, mediante técnicas de modelación de flujo de ocho direcciones (Jenson & Domingue, 1988) el cual involucra una matriz de influencia de 3x3 utilizando la celda central como punto de partida. Con esto se determina cuál es la celda que representa el cambio máximo de elevación con respecto a la celda central, continuando hasta conformar una ruta. El dato final que se coloca en la celda se describe de la siguiente manera.

$$\text{Máximo descenso} = \frac{\text{Cambio de elevación}}{\text{distancia}} * 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Posteriormente se calcula el flujo acumulado en cada celda. Considerando el factor de máxima pendiente en una matriz de 3x3 celdas contiguas, se determina cuantas celdas fluyen hacia la celda central, de manera acumulativa, por lo que los pixeles que se posicionen dentro de la ruta principal de flujo, “acumularán” los pixeles que se encuentren en la misma ruta, pendiente arriba. Este método también fue propuesto por Jenson y Domingue, 1988. Para determinar las rutas se implementó un elemento condicional a manera de filtro, eliminando todos aquellos pixeles que acumularan un valor menor que 50,000. El ráster resultante se procesó para definir los pixeles acumulativos contiguos como entidades independientes. Se definió el nivel de categorización de las corrientes, dependiendo del número de corrientes que van desembocando sobre un afluente principal, mediante el método propuesto por Strahler A. N. (1957; Tarboton, Bras, & Rodriguez-Iturbe, 1991). Este método asigna un orden de 1 a todos las corrientes sin afluentes. El número se intensifica conforme los arroyos del mismo orden se interceptan. Dos vínculos de primer orden dan lugar a uno de segundo orden, sin embargo, la intersección de dos vínculos con diferente orden no aumentará el valor de orden final. Esta clasificación dio como resultado órdenes del 1 al 5, mismos valores que fueron utilizados para la categorización. El resultado de aplicar este método sobre el MDE de 1m, se muestra de manera gráfica en la Figura 31.

3. Método

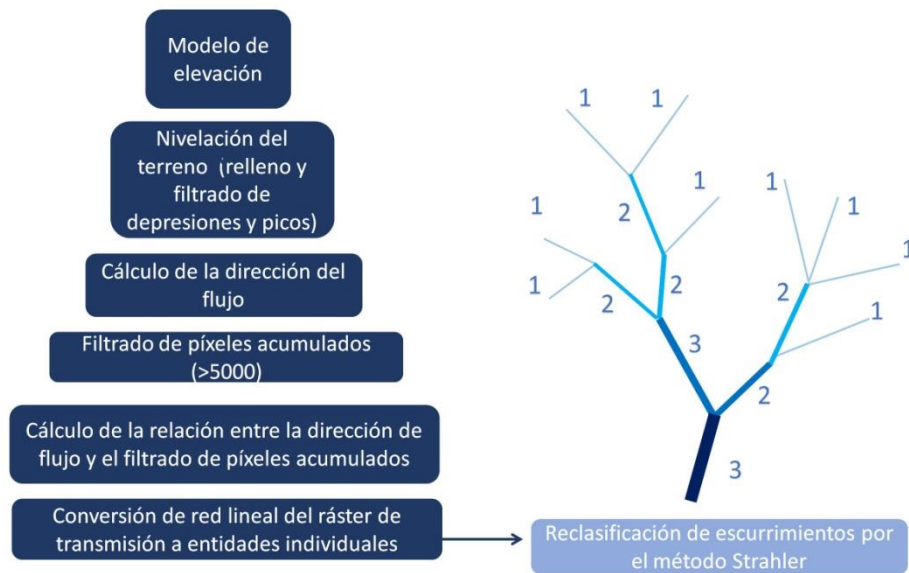


Figura 30. Diagrama de flujo para la generación de arroyos sobre modelo de elevación de 1m (Elaboración propia).

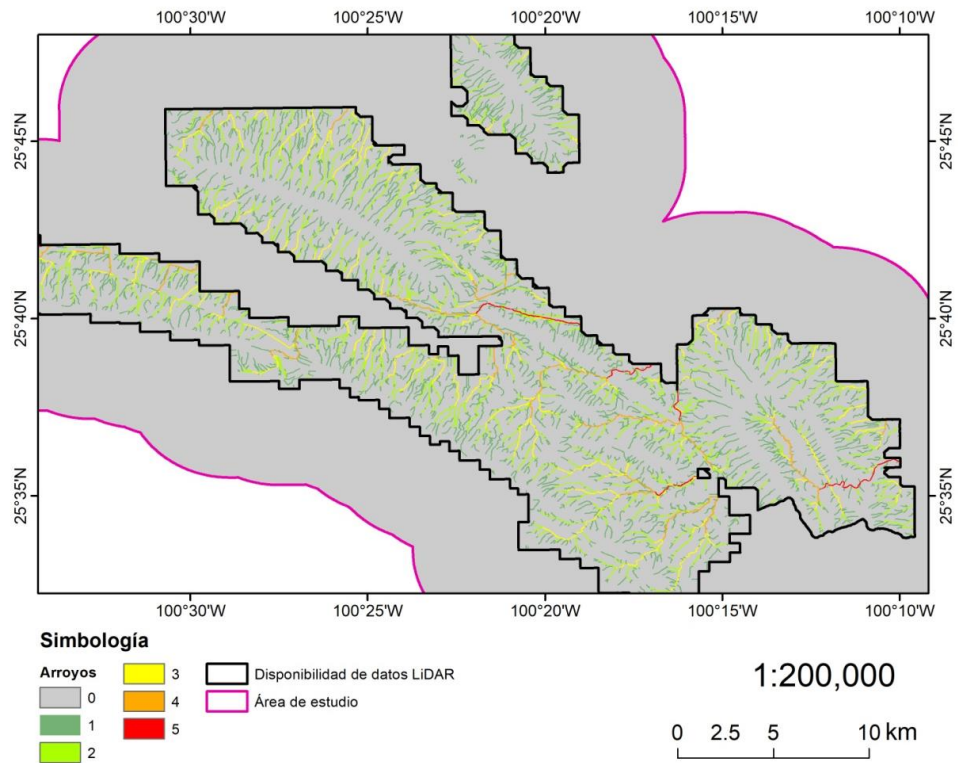


Figura 31. Reclasificación de escurrimientos superficiales obtenidos con base en MDE-LIDAR de 1m.

3. Método

D. Factores antrópicos

Uso de suelo y cobertura vegetal

Para actualizar los datos de cobertura de uso de suelo se realizó la clasificación sobre una imagen multi-espectral satelital, capturada en 2018. Primero se realizó una clasificación no supervisada, con apoyo del resultado de ese proceso y los polígonos de cobertura oficial, se delimitaron puntos de control. Estos puntos, son utilizados como guía para crear la clasificación supervisada, con base en la firma espectral obtenida dentro de los pixeles correspondientes a cada clase. En la Figura 32, se muestra un avistamiento a los puntos utilizados para este procedimiento.

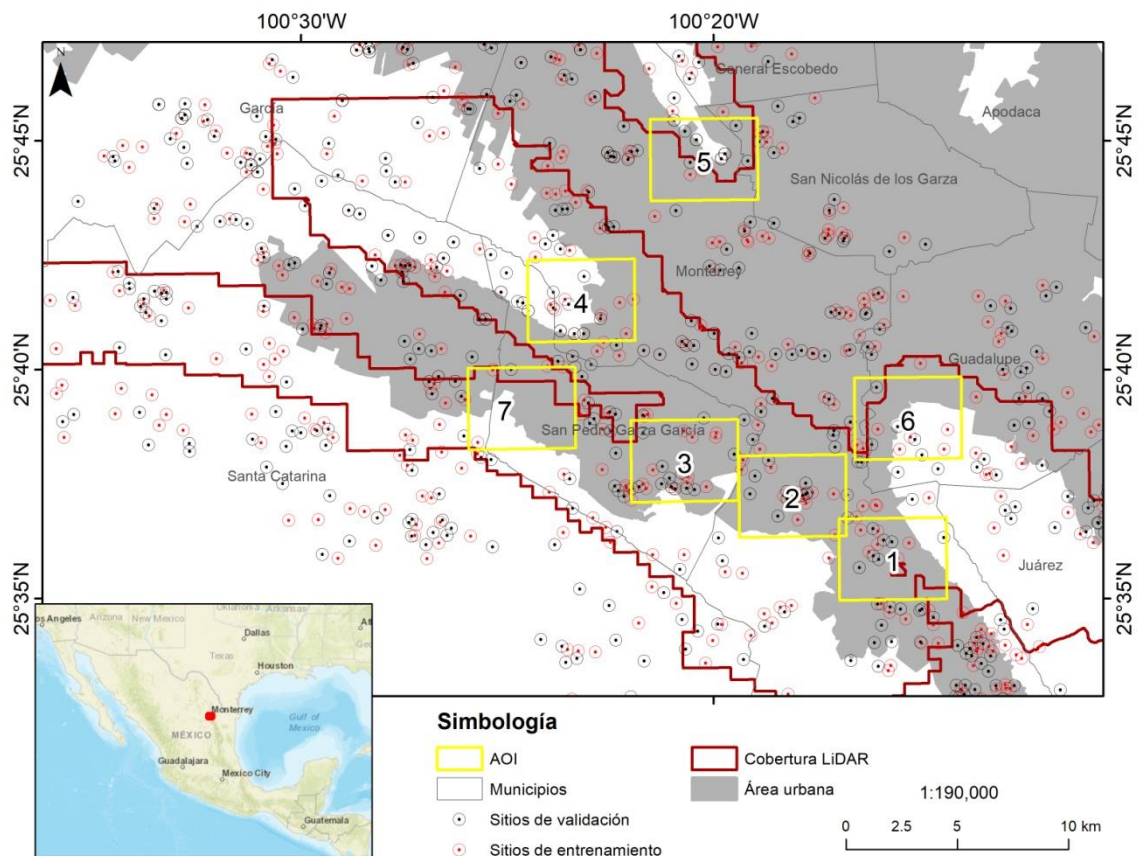


Figura 32. Mapa de ubicación del área de estudio con los sitios utilizados para entrenamiento y validación.

Las técnicas implementadas son 4 (Figura 33): Clasificación de Máxima Similitud simple y probabilístico (MLC y MLCp) y Modelo de Mezclas Gaussianas (GMM); Así como, una metodología de clasificación experimental basado sobre una imagen normalizada con NDVI, que a su vez fue clasificada por MLC Y metodología de

3. Método

clasificación no supervisada (segmentación de imagen sin entrenamiento). El procedimiento se detalla en la Figura 34.

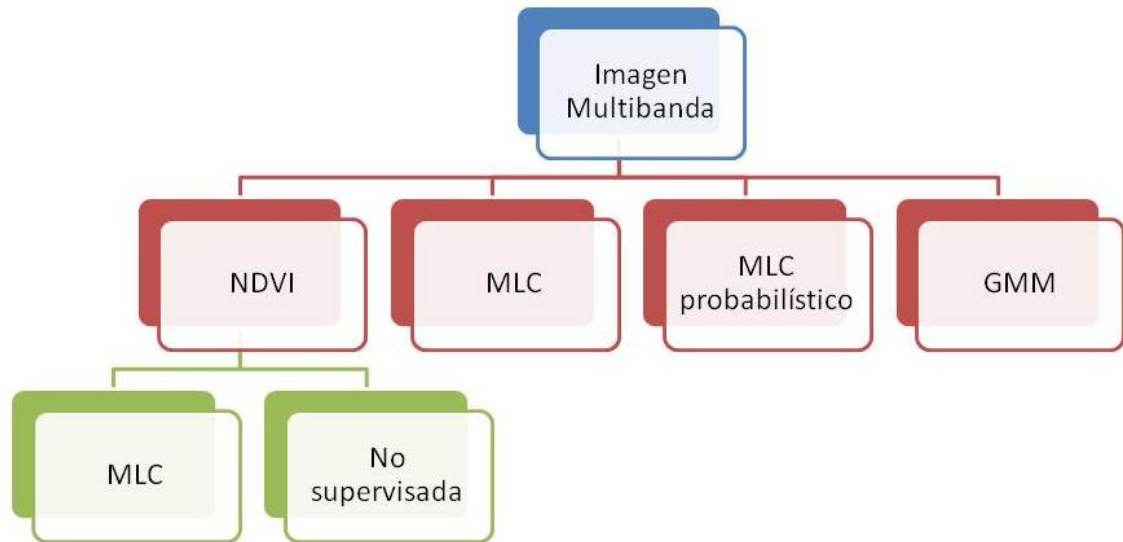


Figura 33. Técnicas implementadas en el presente proyecto para clasificar la imagen satelital. NDVI, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, MLC, Clasificación de Máxima Similitud, GMM, Modelo de mezclas gaussianas y Clasificación por agrupación no supervisada.

3. Método

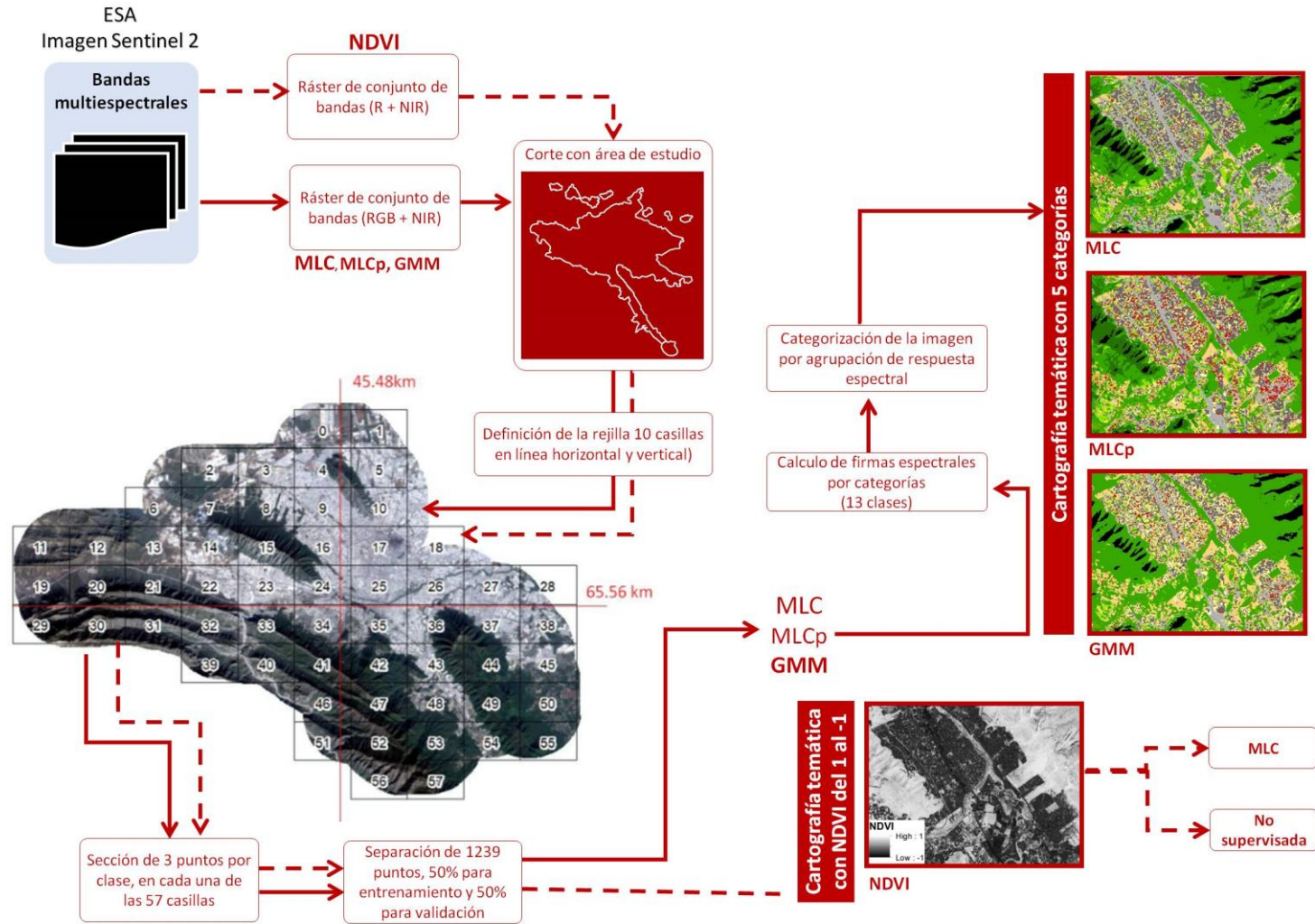


Figura 34. Diagrama de flujo general para clasificación de imágenes.

3. Método

Imagen Satelital multiespectral SENTINEL 2

Se realizó una revisión de las imágenes satelitales más recientes para el área de estudio. Debido al porcentaje de nubes presentes, se limitó a la última fecha con menor cantidad de porcentaje de cobertura por nubes, dando como resultado una imagen de Enero de 2018. Se utilizó un arreglo de 4 bandas, que corresponden a la región del color real visible (canales rojo, verde y azul) y al infrarrojo cercano.

En este apartado se muestran las dos diferentes técnicas implementadas para la clasificación de la imagen seleccionada, posteriormente se muestran los indicadores de calidad implementados.

Sitios de entrenamiento y validación

Como parte del pre procesamiento de la imagen, se delimitaron sitios de control. Los puntos de control son sitios ubicados con coordenadas XY dentro de la imagen, de los cuales ya se comprobó la clase a la que corresponde dicho punto. Para determinar la cantidad de puntos se realizó una rejilla de muestreo, con celdas de 4.5 por 6.5, de tal manera que los ejes principales registraran 10 celdas en X y Y. Se eliminaron las celdas que contuvieran menos del 50 % de cobertura de la imagen. La rejilla final utilizada se representa en la Figura 34. Sobre cada una de las celdas resultantes se procuraron máximo 3 puntos por clase, si no había elementos de la clase no se ponían puntos en esa celda. En total, se registraron 1,239 puntos, de los cuales se utilizaron 620 puntos para entrenamiento (50%) y 619 (50%) puntos para validación.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)

Cuando se trata de cambios en la cobertura de uso de suelo relacionados a cambios en el microclima complementario, es más habitual encontrar proyectos que basen su clasificación en una imagen tratada con el índice NDVI, presentándose trabajos como: DeFries, R. S., & Townshend, J. R. G. (1994); Carlson, T. N., & Arthur, S. T. (2000); Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., & Yin, Z. Y., (2006). La imagen tratada con NDVI se utiliza como un cambio en el insumo generado para ser posteriormente tratado por un método de clasificación alterno, como lo serían el GMM y el MLC. Aunque los resultados pueden variar dependiendo de la zona y de la constelación satelital del insumo, la integración del canal infrarrojo a la imagen base, ha mostrado grandes efectos positivos incrementando la precisión de la clasificación (Schuster, Förster, & Kleinschmit, 2012). Este índice se deriva del radio de reflectancia entre la respuesta obtenida en la región del rojo visible, *RED*, y el infrarrojo cercano, *NIR*, (Tucker, 1979).

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (\text{Ecuación 5})$$

El resultado de aplicar este índice es una imagen normalizada con un intervalo de valores que van de -1 a +1, donde los valores negativos corresponden a la ausencia de

3. Método

vegetación (Myneni, Hall, Sellers, & Marshak, 1995; Pettorelli, Vik, Mysterud, Gaillard, Tucker, & Stenseth, 2005).

Tipos de clasificaciones de imagen utilizados

En este apartado se muestran las dos diferentes técnicas implementadas para la clasificación de la imagen seleccionada, posteriormente se muestran los indicadores de calidad implementados.

Clasificación de Máxima Similitud (MLC)

Este método (En inglés llamado Maximum Likelihood Classification) es ampliamente usado para monitorear y calcular el cambio de uso de suelo (Dewan & Yamaguchi, 2009) es uno de los métodos más comunes (Foody, Campbell, Trodd, & Wood, 1992), y se ha comprobado que ha tenido los mejores resultados cuando las clases asignadas tienen una distribución Gaussiana (Bolstad & Lillesand, 1991), incluso suele utilizarse como base para hacer comparaciones con otros clasificadores (Erbek, Özkan, & Taberner, Comparison of maximum likelihood classification method with supervised artificial neural network algorithms for land use activities, 2004). Trabajado desde ArcGIS (ESRI Inc., Redlands, CA, USA) esta clasificación basa su procedimiento en la ecuación bayesiana. En donde D es la probabilidad de que un vector desconocido X pertenezca a una clase conocida M_c (Otukey & Blaschke, 2010). Finalmente, el vector desconocido se clasificará dentro de la categoría a la que tenga más probabilidades de pertenecer.

$$D = \ln(a_c) - [0.5 \ln(|cov_c|)] - [0.5(X - M_c)T(cov_c - 1)(X - M_c)] \quad (\text{Ecuación 6})$$

Para utilizar este método, se requiere conocimiento previo de las clases que se van a utilizar, y el comportamiento espectral de las mismas (Erdas, 1999). Algunas comparaciones en las que se ha visto involucrado este método con respecto a decisión tres y support vector machines (Otukey & Blaschke, 2010).

Modelo de mezclas Gaussiana (GMM)

Este método (en inglés llamado Gaussian Mixture Model) clasificador fue desarrollado por Mathieu Fauvel con especial interés en bosques, y posteriormente fue modificado por Karasiak (2017). A diferencia del método anterior que considera píxeles individuales, el GMM, funciona a partir de la agrupación de píxeles basados en la similitud de los valores que contiene, para lo cual se necesita de sitios de entrenamiento tipo cluster. Este método ha sido utilizado como base para comparaciones temporales de cambio de cobertura vegetal (Karasiak & Perbet, 2018; Skakun, y otros, 2017) e incluso como un clasificador secundario sobre imágenes tratadas a partir de índices de detección de incendios (Potić, Ćurčić, Potić, Radovanović, & Tretiakova, 2017) complementado con otros métodos como el algoritmo de Random Forest.

3. Método

La agrupación de los pixeles se obtiene a partir de un modelo linear de distribución Gaussiana (Ecuación 7).

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(x|\mu_k, \Sigma k) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde K es el número de agrupaciones, $N(x|\mu_k, \Sigma k)$ es la probable distribución de densidad de la muestra, π_k es el coeficiente de mezcla para cada distribución de k (Bishop, C.M., 2006).

Categorías

Para elegir las categorizas o clases para la clasificación se realizaron dos tipos de análisis. De la serie V de INEGI se determinaron 18 clases de cobertura de uso de suelo dentro del área de estudio. Estas clases se reagruparon en 5 categorías (Tabla 15) para obtener las coberturas necesarias para el estudio basados en Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2005). Para la clasificación de la imagen Sentinel 2 se determinaron 13 clases, Tabla 15, conforme a la revisión visual del sitio, las cuales fueron posteriormente reclasificadas para ser integradas dentro del modelo SIG Tabla 16.

Tabla 15. Cálculo de coberturas sobre información de INEGI, sobre el polígono utilizado para el presente proyecto.

Categoría INEGI	Categorías propuestas	Descripción	Área (km ²)	%
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos	Zonas urbanas, edificaciones, casas, etc.	498.0	36.7
Bosque	Bosque	Estructura vegetal alta e intensa	128.4	9.5
Suelo	Suelo	Sin cobertura vegetal aparente	7.9	0.6
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	lagos, presas, encharcamientos	0.2	0.0
Matorral	Matorral	Estructura vegetal media	678.0	50.0
Pastizal	Pasto	estructura vegetal baja y poco intensa	20.0	1.5
Agricultura	-	Sembradíos	24.7	1.8

Tabla 16. Reclasificación de uso de suelo, Modificado (De Tamaulipas, 2009).

Clase	Tipo de vegetación de la clasificación	Atributo Relativo
Otro	Sombras y agua	0
Vegetación intensa	Bosque de coníferas	1
Vegetación moderada	Matorral desértico rosetófilo, pastizales y Vegetación halófito	2

3. Método

Cultivos anuales	Agricultura de temporal y de riego	3
Zona urbana	Zona urbana, caminos, pavimentos	4
Áreas deforestadas	Suelo desnudo, área sin vegetación aparente, suelo desnudo agrícola	5

Validación

Para evaluar la confiabilidad de las clasificaciones realizadas por los diferentes métodos se utilizó un coeficiente de precisión. El coeficiente de precisión indica la calidad del resultado obtenido de un método y este a su vez está estandarizado para poder ser comparado con los otros métodos. Para poder realizar esto se usó una matriz de confusión, también conocida como tabla de contingencias, y el coeficiente de Kappa con el cual se comparan los valores “verdaderos” del terreno, definidos por el usuario, contra los valores obtenidos a través del método de clasificación. Los valores obtenidos que coinciden con el valor real se van acumulando en la línea diagonal principal de la matriz de resultados. Es decir, este coeficiente es el porcentaje de casos que fueron correctamente clasificados (Foody, 2002). El coeficiente de kappa ha sido ampliamente usado, incluso sugerido como una medida estándar de precisión de la clasificación (Smits, Dellepiane, & Schowengerdt, 1999).

Post procesamiento para clasificación de imagen Sentinel 2

Como capa de insumo relacionada a este factor, se obtuvo una capa de uso de suelo actualizada con la clasificación resultante del procesamiento de una imagen satelital proveniente del satélite Sentinel 2. Esta imagen fue procesada mediante 4 técnicas de clasificación: Clasificación de Máxima Similitud (MLC) y MLC probabilístico, Modelo de Mezclas Gaussianas (GMM) y una segmentación de la imagen pre-procesada bajo un NDVI. Los resultados se muestran en la Tabla 17, junto con el índice de precisión por clase. La mejor clasificación se obtuvo por el método GMM, tanto precisión (71%) como precisión por el método de Kappa (65.9%). Los resultados se muestran de manera gráfica de la Figura 35 a la Figura 41.

3. Método

Tabla 17. Estadísticas de precisión de clasificación de imagen.

	clase	MLC	MLC probabilístico	GMM
Kappa		60.9	58.9	65.9
Índice de Precisión		66.7	64.8	71.7
Bosque encino	1	64.2	71.4	49.9
Matorral	2	68.1	63.6	87.7
Pasto	3	58.6	65.0	61.6
Calles	4	82.2	77.3	69.7
residencial (urbano)	5	67.7	44.8	39.4
Cuerpos de agua	6	60.0	47.6	38.1
Sombras	7	92.5	89.7	87.4
Suelo	8	55.3	52.6	75.9
Vegetación rojiza	9	81.6	78.3	80.7
Roca expuesta	10	46.8	67.2	55.7
Tierra roja	11	27.8	19.1	23.8
Derrubios	12	16.3	5.7	22.1
Techos rojos	13	30.2	33.7	30.1

Sitio 1

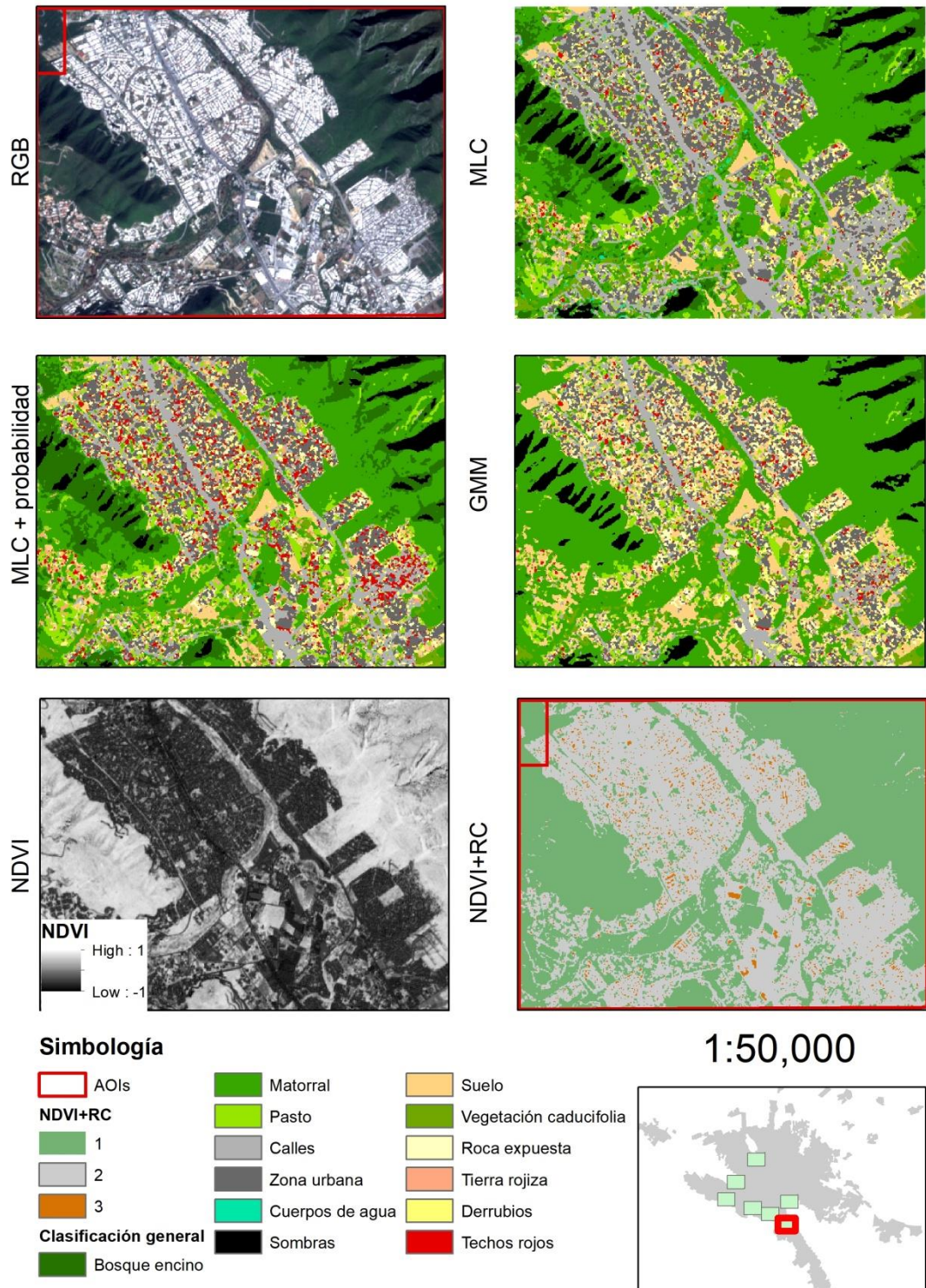


Figura 35. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 1.

Sitio 2

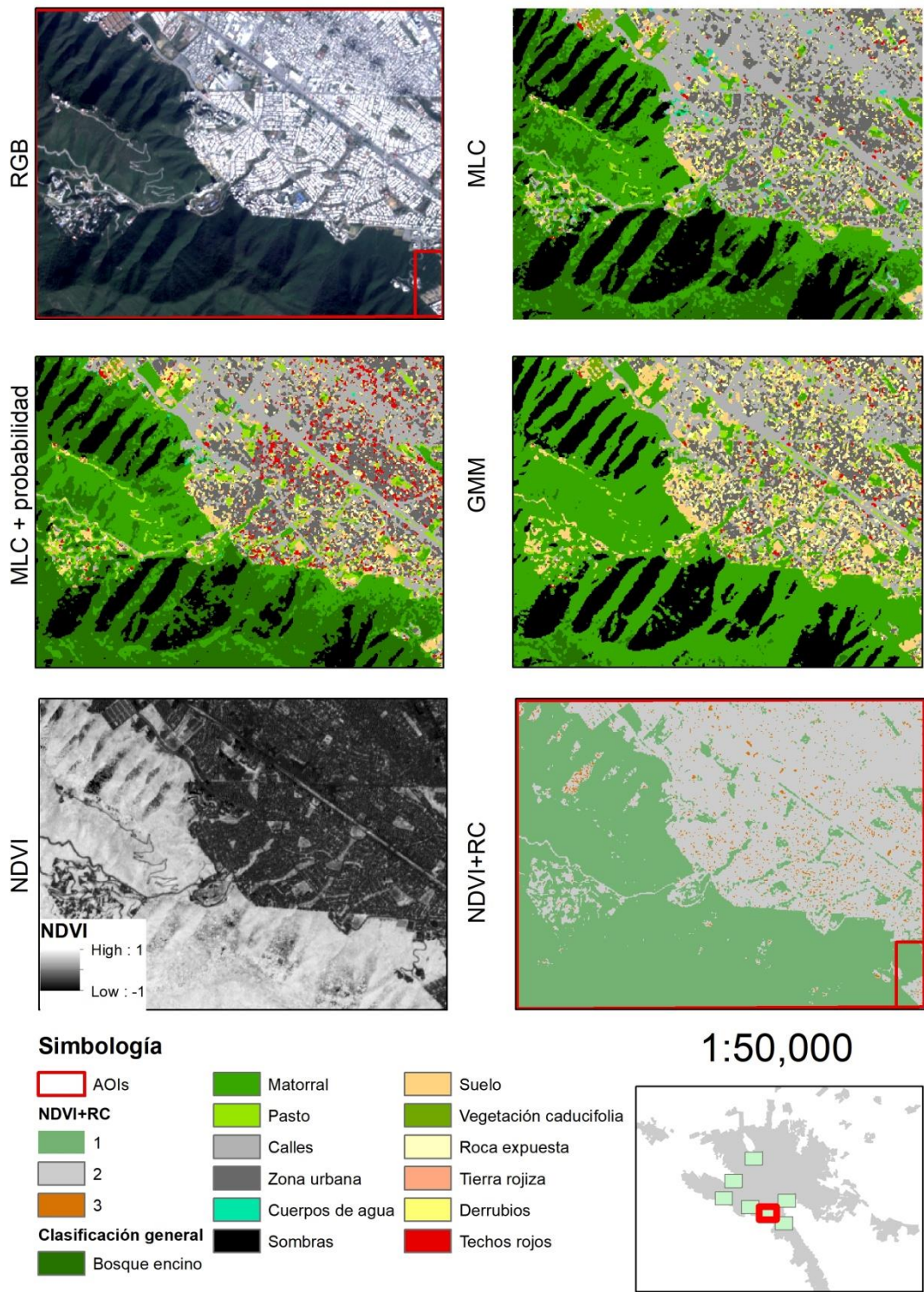


Figura 36. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 2.

Sitio 3

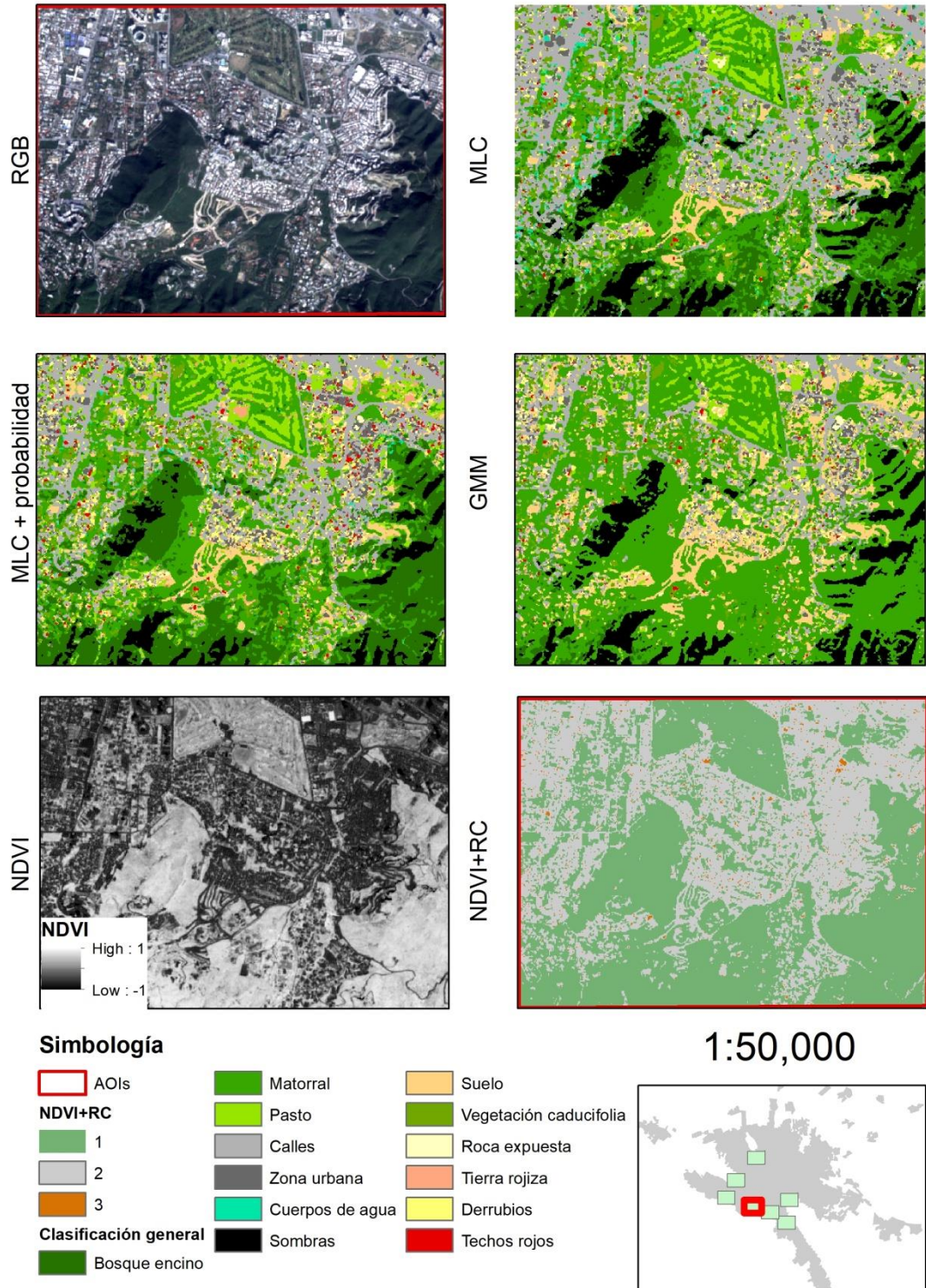


Figura 37. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 3.

Sitio 4

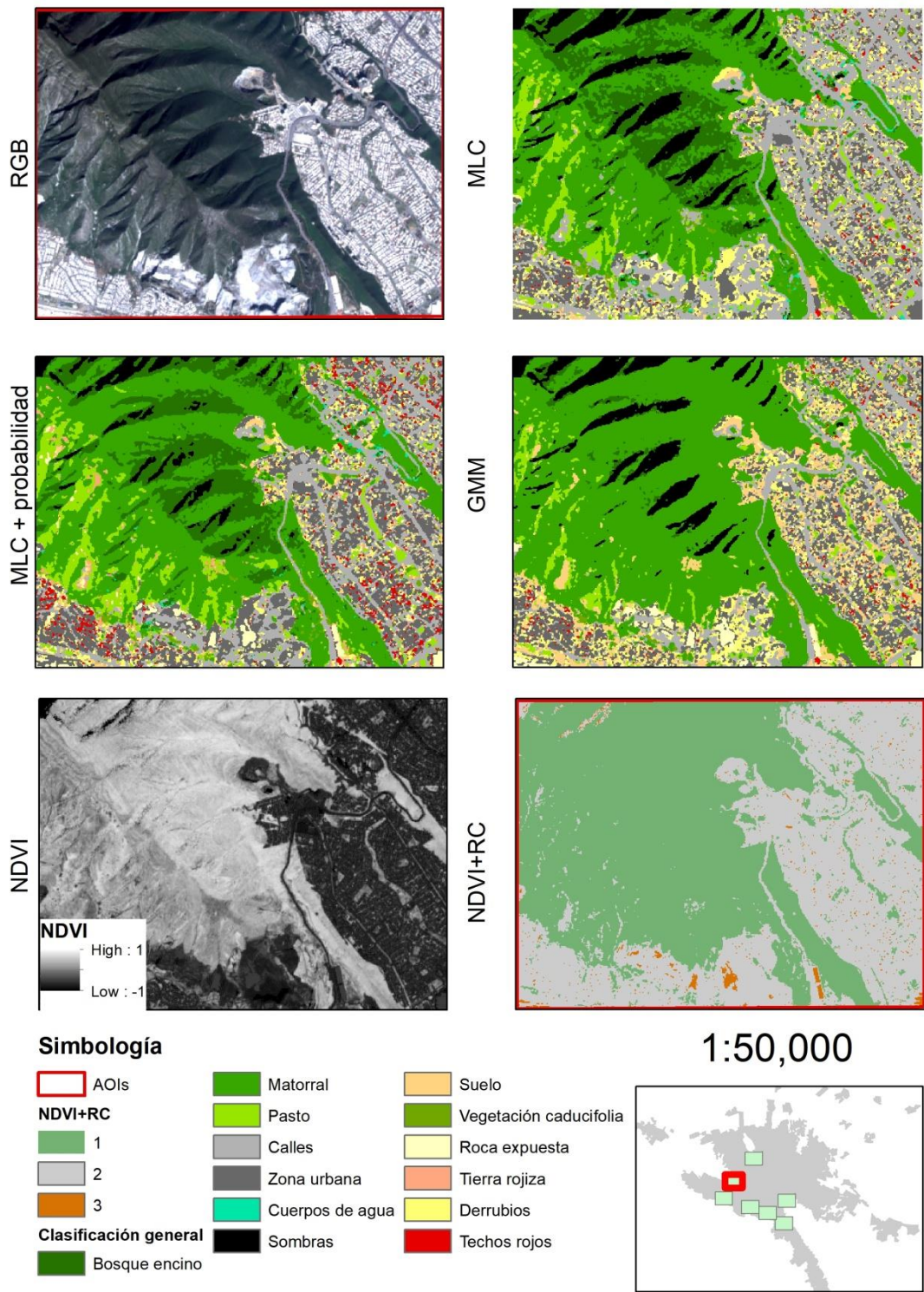


Figura 38. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 4.

Sitio 5

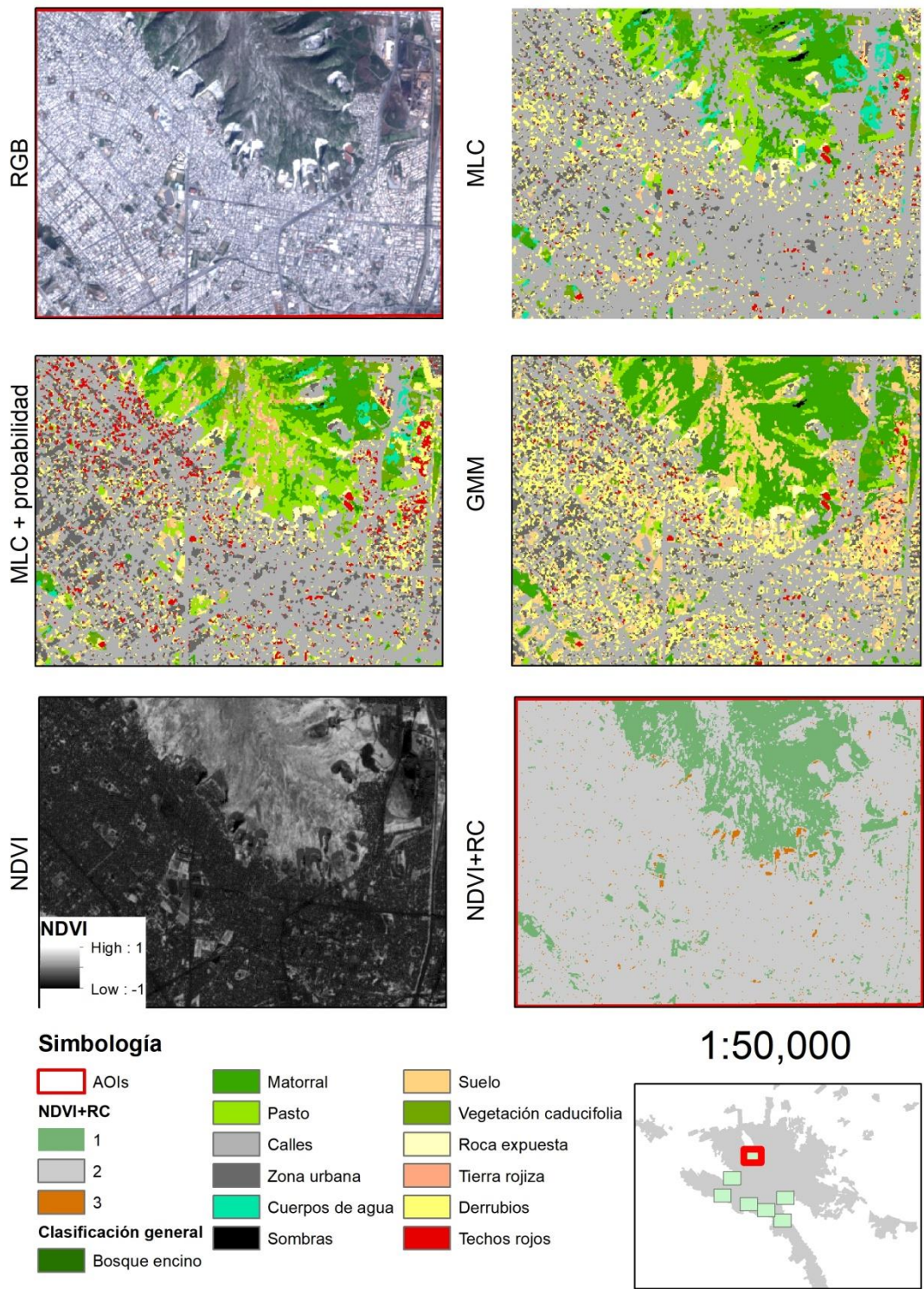


Figura 39. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 5.

Sitio 6

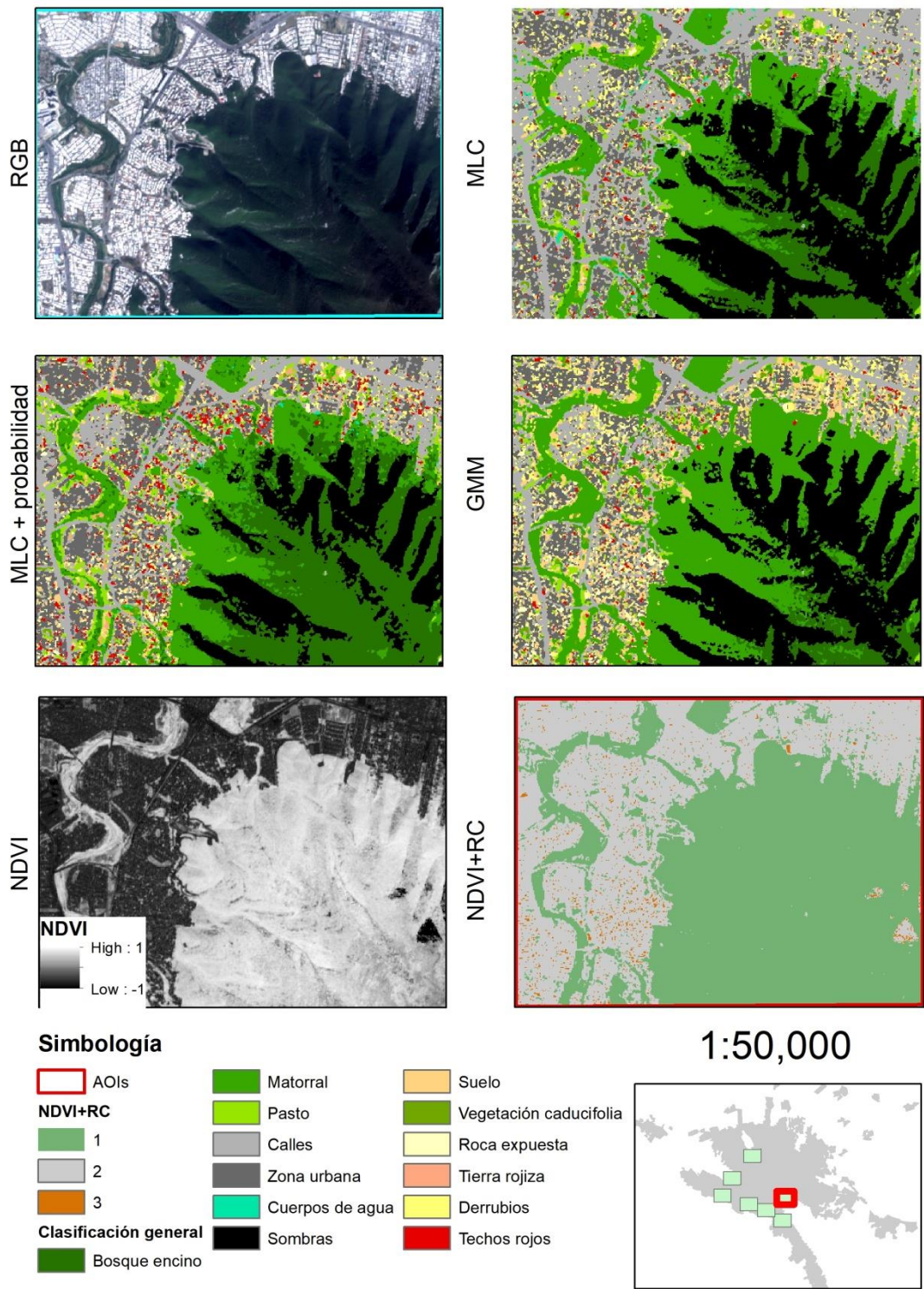


Figura 40. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 6.

Sitio 7

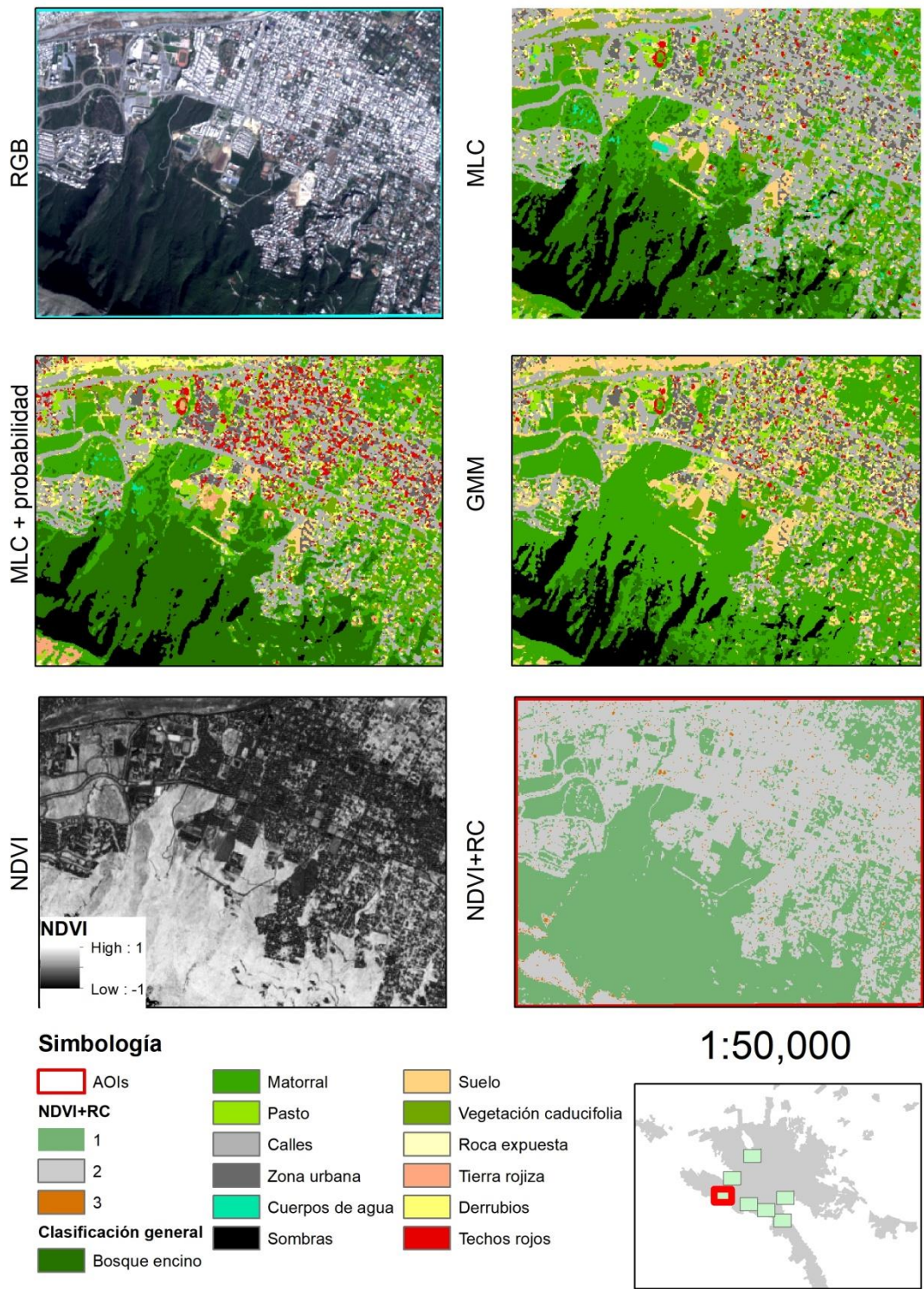


Figura 41. Resultados, clasificación de imagen Sentinel para el sitio 7.

3. Método

3.3 Detección de posibles deslizamientos históricos.

El mapeo manual de los deslizamientos requiere de deducciones geomorfológicas subjetivas, que varían dependiendo de la experiencia del autor, pero se pueden agrupar las conjeturas principales. Cuando ocurren deslizamientos, estos, dejan una huella sobre el terreno, que es visible desde una perspectiva aérea, por lo que se han realizado inventarios a partir del estudio de imágenes satelitales, fotografías aéreas y modelos de elevación (Guzzetti, Mondini, Cardinali, Fiorucci, Santangelo, & Chang, 2012). Aunque, se han realizado diversos algoritmos complejos que comprueban la efectividad de utilizar imágenes multi-espectrales de alta resolución para reconocimiento de deslizamientos, también es bien sabido que en la mayoría de los casos es difícil conseguir ese tipo de información (Martha, Kerle, Jetten, & Kumar, 2012). Por lo que, se siguen implementando métodos de digitalización (delineation) tradicional basados en la experiencia del usuario para inventarios manuales, en la mayoría de los casos, para cálculos de precisión de modelos de susceptibilidad a deslizamientos (Bai, Lü, Wang, Zhou, & Ding, 2011). Este inventario se realizó con base en una revisión visual de la cobertura del suelo sobre imágenes históricas con componente 3D (altura ortométrica, Ortofotos). El intervalo de años estudiado abarca desde 2002 hasta 2017, comparando imágenes de tres bandas en color real, proyectadas dentro de la plataforma de Google Earth, implementando fotogeología.

Para realizar el mapeo se tomaron en cuenta una serie de suposiciones tanto geomorfológicas como de cobertura (Guzzetti, Mondini, Cardinali, Fiorucci, Santangelo, & Chang, 2012), las cuales se describen a continuación: Desde el punto de vista geomorfológico, dependiendo del tipo de deslizamiento ocurrido, se pueden reconocer diferentes estructuras. En el caso de derrumbes se pueden observar estructuras en el terreno como escarpes, que son el punto más alto de ruptura de la masa que se deslizó, así como montículos depositados pendientes abajo. En el caso de flujos o flow slides, se presentan movimientos de masa que fluyen con dirección de corrientes superficiales, generando una estructura superior en forma de herradura que después se abre en el sentido del depósito. Por otro lado, visualmente, los deslizamientos también generan una cicatriz sobre el terreno, los movimientos abruptos de la superficie del terreno generan huecos en la vegetación, exponiendo la roca que se encuentra por debajo (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996).

Método de comparación CCM y método propuesto TCM

Aunque, se ha demostrado la utilidad de estos métodos, también se ha señalado que, dependiendo de la técnica utilizada, se puede sesgar el tipo de deslizamientos obtenidos, con base en la forma provocada por el movimiento del terreno y la clasificación del deslizamiento (Wills & McCrink, 2002; Galli, Ardizzone, Cardinali, Guzzetti, & Reichenbach, 2008), por lo que, en la presente contribución se presenta la comparación entre dos métodos automatizados, que posteriormente fueron verificados

3. Método

a través de un reconocimiento manual realizado a partir de fotogeología. El primer método consiste en una adaptación basada en el método CCM propuesto originalmente por Leshchinsky (2015). El segundo método es propuesto en este artículo, basado en patrones de flujo y áreas de captación de lluvia, el cual ha sido nombrado Topographic Connection Method (TCM). Ambos métodos fueron validados con reconocimiento visual desde imágenes satelitales históricas, que son el resultado de la combinación de imágenes multi-espectrales de alta resolución y modelos de elevación de 30 x 30 m por pixel.

Método de Conexión de contornos (CCM)

La necesidad de conseguir inventarios más complejos y especializados de una manera rápida y eficiente, ha llevado a la implementación de algoritmos automatizados para el análisis superficial. Los MDE son una de las herramientas más importantes, basando el cálculo de deslizamientos desde el punto de vista geomorfológico. Algunos autores, mezclan esta información, con datos del área que puedan ayudar a dar más definición al inventario final, datos litológicos, de cobertura superficial del suelo, o datos del entorno ambiental, como la precipitación, son ampliamente utilizados para complementar estos modelos.

Sin embargo, la falta de precisión y disponibilidad de los datos sobre áreas específicas, mantienen a algunos autores desarrollando modelos que se basan únicamente en el comportamiento, lo que permite un estudio especializado de la relación que existe entre el relieve y los procesos que involucran a los desplazamientos. Este estudio está basado en el modelo Countour Connection Method (CCM) propuesto por Leshchinsky (Leshchinsky, Olsen, & Tanyu, 2015) para detección deslizamientos, modelo que posteriormente fue modificado por Gaidzik (Gaidzik, Ramírez Herrera, Bunn, Leshchinsky, Olsen, & Regmi, 2017), para ser trabajado parcialmente sobre un ambiente SIG, en donde se dio especial atención a desarrollar la detección de escarpes, proceso que no estaba bien definido dentro del modelo de Leshchinsky.

Para detectar los escarpes, se implementó parte del desarrollo propuesto por Gaidzik, primero se suavizó el MDE, aplicando un filtro de estadísticas focalizadas (Focal Statistics) tomando como referencia un recuadro de 3 pixeles cercanos. Se calculó, a partir del modelo suavizado, la pendiente entre pixeles contiguos. Adicionalmente se implementó un reconocimiento de la curvatura del MDE el cual se obtiene al calcular la derivada segunda de la superficie, con esto se calculó el plano de curvatura (CPL) y el perfil de curvatura (CPR) y con esto se determina con base en el relieve, si el flujo aumenta o disminuye. El CPL, el cual es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima, es decir analiza el comportamiento lateral de la celda, se relaciona con la convergencia y divergencia de la corriente de una superficie, con valores positivos, para superficies convexas, negativos para superficies cóncavas y 0 para superficies lineales. El CPR indica la dirección de la pendiente máxima, reflejando valores negativos, cuando la

3. Método

superficie es convexa hacia abajo, y positivo, cuando la superficie es cóncava hacia arriba y un valor cero para la superficie lineal. Se calculó un Índice de Escarpe (Scarp Index, SI, propuesto por Gaidzik) el cual se obtiene al multiplicar el análisis de pendiente (Slope) y el perfil de curvatura (CPR).

$$SI = S \times CPR \quad (\text{Ecuación 8})$$

El escarpe se obtiene aplicando un umbral al resultado obtenido. En este caso el umbral se centra en $-354 < SI < 291$ (El umbral es adaptado al sitio, calibrando el valor para abarcar los escarpes que pueden ser reconocidos en el sitio visualmente) para obtener el remanente, lo que no corresponde a un escarpe. Por otro lado, también se realizó un análisis de la rugosidad del terreno (Vector Terrain Ruggedness, VRM) por el método de Sappington (Sappington, Longshore, & Thomson, 2007), quien a su vez se basa en la teoría de Hobson (Hobson, 1972). El algoritmo mide la rugosidad del terreno a partir del comportamiento de las celdas vecinas, normalizando el resultado en un intervalo que varía entre 0 y 1, donde 1 es el valor más alto de variación. Para obtener las zonas de escarpe por este método se especificó un umbral, considerando $VRM > 0.025$. La fusión del resultado de ambas metodologías permitió, utilizando máscaras, obtener las zonas de scarpe que posteriormente son utilizadas como referencia para ubicar los vértices correspondientes y completar el modelo CCM de Leshchinsky.

El modelo CCM de Leshchinsky, como se observa en la Figura 42, se basa en la detección de escarpes sobre el terreno y su respectiva gradiente de depósito (deposit gradient). El modelo secciona la información del MDE en isolineas topográficas, es decir, curvas de nivel. Posteriormente, se crean nodos, a lo largo de estas líneas, para funcionar como una base para el modelo. Los vértices correspondientes a zonas de escarpe son posteriormente conectados al vértice más próximo y de menor pendiente al anterior a través de una búsqueda radial, dependiendo de la distancia entre nodos. Los nodos se seleccionan consecutivamente hasta cumplir un umbral asignado por el usuario, creando líneas vectoriales como conexión. La cobertura de estas conexiones se delimitó por medio de polígonos.

Debido a la adaptación del modelo para su uso específico en el área de estudio, no se pudo utilizar el algoritmo original. Por lo tanto, se recreó el algoritmo de manera independiente con base en la metodología descrita por Leshchinsky. Las zonas de escarpe se obtuvieron mediante el método de Gaidzik combinado con Sappington.

Como método alternativo a la unión de nodos con respecto al terreno, se determinó una alta densidad de líneas de flujo, para cubrir toda la zona de captación. Para poder seguir con la metodología primero se suavizó el modelo de elevación, rellenando las variaciones mayores de alturas entre celdas contiguas, eliminando oquedades que pudieran cortar las líneas de flujo. Se consideraron valores de acumulación de flujo mayores a 50, a diferencia de los 2000 que se utilizan normalmente para crear una red

3. Método

de arroyos. Los valores de acumulación de flujo, representan la cantidad de celdas que fluyen hacia una celda de pendiente descendiente, entre mayor sea el valor, mayor es el orden de la corriente correspondiente. En este caso, se utilizó un umbral bajo para considerar una línea sobre cada celda y así conseguir la conexión entre nodos de pendientes descendientes como se propone en el modelo de CCM. Se intersectaron todas las líneas que partieran de las zonas de escarpe, culminando en el vértice final de la cuenca a la que pertenecen las líneas. Finalmente, se consideró un área de influencia de 20 m alrededor de las líneas seleccionadas para crear los polígonos de deslizamientos.

Método de conexión topográfica (TCM)

Según la clasificación de deslizamientos, los deslizamientos se pueden agrupar en tipos principales dependiendo de los mecanismos involucrados en el movimiento, estos pueden ser rotacionales, traslacionales, en donde se forma un desgaje principal en la parte más alta del deslizamiento, y el resto del material se desplaza hacia abajo, también existen caídas de bloques en terrenos más rocosos (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). El área de estudio, sin embargo, presenta una mayor cantidad de elementos ocasionados por el flujo y la escorrentía. Con base en este principio, se propone combinar la metodología utilizada para detectar escarpes, propuesta por Gaidzik y Sappington, con el área de captación de una microcuenca como se presenta en la Figura 42.

Considerando, que después del desgaje, el material desplazado va a seguir la dirección del flujo durante su caída. Se determinaron primero las zonas de escarpe, mediante dos métodos. El Método VRM (Vector Ruggedness Measure, (Hobson, 1972; Sappington, Longshore, & Thomson, 2007) se basa en la variación de la rugosidad del terreno, considerando la variación de altura y orientación con respecto al norte, entre celdas contiguas. Esta operación normaliza los valores de rugosidad en un intervalo entre 0 y 1, aunque en terrenos típicos, la variación radica entre 0 y 0.4. Para el área específica de estudio se consideró como escarpe, las celdas con valores mayores a 0.04, la rugosidad permite obtener las zonas de escarpe por lo que el valor fue calibrado de tal manera que la cobertura resultante coincidiera con los escarpes conocidos en el sitio. Estas delimitaciones se combinaron con el resultado del método de Gaidzik antes descrito. Realizando una operación booleana sobre el resultado de ambos métodos para combinarlos mediante el cálculo de ráster y después vectorizando el resultado.

Para obtener las áreas de captación, se modificó el MDE del área de estudio, utilizando los escarpes delimitados como un factor adicional, que le daría mayor valor de altura a la zona. De esta manera se delimita el área de captación para que inicie la escorrentía desde la zona del escarpe. Una vez que se genera el desgaje sobre la roca, esta va a fluir sobre las corrientes superficiales por lo que se calculó la dirección de flujo. Se calculó la acumulación de flujo (FA) para determinar la red de arroyos del área de

3. Método

estudio. Se determinó el área de captación de las zonas correspondientes a los escarpes. Para crear la red de arroyos, a partir de una operación booleana, con la intención de obtener las celdas con valores arriba de los 2000, estas celdas representan las corrientes de flujo. Con esta información, se obtuvieron segmentos de áreas de captación, tomando como base las zonas de escarpe. Finalmente se realizó una interpolación entre los polígonos resultantes con las zonas de escarpe. Con esto, se obtuvieron los polígonos en los que existe una mayor probabilidad de que existiese un deslizamiento.

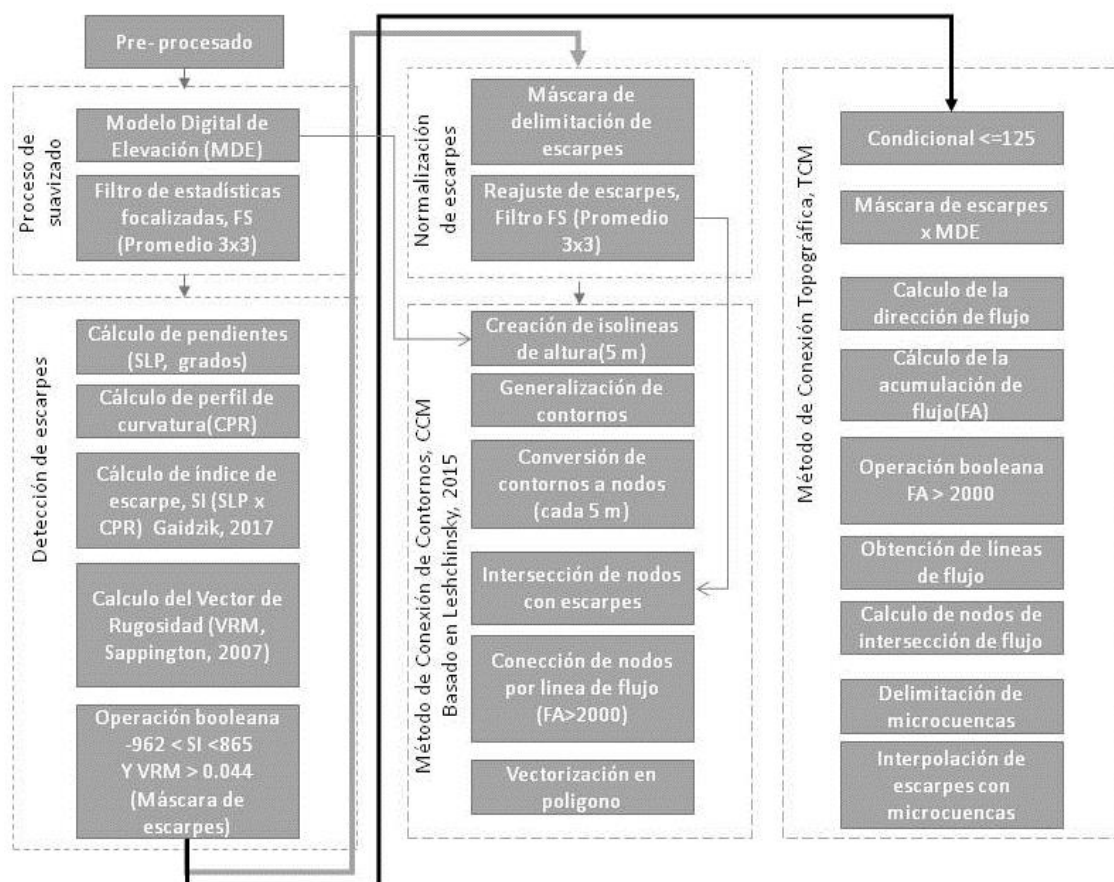


Figura 42. Diagrama de flujo, comparación de métodos automatizados para reconocimiento de sitios de deslave. Modificado de (Ramírez Serrato, Yépez-Rincón, & Ferriño Fierro, 2019).

Análisis de coberturas

El análisis de las áreas propuestas para deslizamientos se realiza a través de un cálculo de traslape de áreas. El resultado de los dos métodos automatizados y el método manual se reflejan como delimitaciones de polígonos de cobertura. Considerando que, el área cubierta por deslizamientos es menor al área total de la zona de estudio, se

3. Método

recomienda realizar la comparación sobre áreas de concordancia basados en la siguiente ecuación (Borghuis, Chang, & Lee, 2007).

$$P = \left[\frac{(\text{área de traslape por método automatizado})}{(\text{área total delimitada por el método manual})} \right] * 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Para este proceso se determinó una cobertura de deslizamientos por el método manual de 1.29 km², mientras que la cobertura total de la zona mapeada, bajo este método, es de 73 km². Por lo que realizar una matriz de covarianza podría resultar en el análisis de las zonas fuera de deslizamiento y no en el 1.76% de interés.

Índice de forma

Como parte del método estadístico de comparación, se consideró el índice de forma. El índice de forma, consiste en una relación (cociente) entre el perímetro y la raíz del área del círculo. Este índice, se utiliza para conocer la sinuosidad del límite del polígono de estudio. En hidráulica se conoce como Índice de compacidad (Gravelius, 1914; Bardossy & Schmidt, 2002) y es usado para describir la forma del polígono. Este parámetro es útil, y ampliamente utilizado para describir la relación ecológica del paisaje (Lang and Blaschke, 2007). El comportamiento hidrológico de las microcuencas puede ser comparado a través de la delimitación de su forma física (Liu, 2011). En este caso, se utilizó la ecuación 2, que no es más que la forma simplificada de la ecuación 1, para asignar un valor a cada polígono que refiriera a la redondez de la forma. Considerando la forma geométrica circular como la forma más compacta, se construye el índice tomando como constante la relación entre el perímetro y el área del círculo (Ecuación 10).

$$I = \frac{P}{\sqrt{A}} = \frac{\pi 2r}{\sqrt{\pi r^2}} = \frac{2r\sqrt{\pi}\sqrt{\pi}}{r\sqrt{\pi}} = \sqrt{\pi} \approx 3.54 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Esta relación, de resultado 3.54, se integra dentro del índice de forma como una constante, dando como resultado 1 cuando la figura es tan compacta como un círculo. Entré más sinuosa se la forma, mayor será el valor que arroje la ecuación.

$$IF = \frac{P}{3.54\sqrt{A}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Tomando el círculo como la figura geométrica más compacta, donde se maximiza el área con el menor perímetro. El Índice de forma resultante para una figura circular es

3. Método

de 1, aumentando a 1.13 para un cuadrado, entre mayor sea el resultado, mayor será la sinuosidad o irregularidad de la forma que se está evaluando.

3. Método

3.4 Trabajo de campo

Actualmente, no se cuenta con la adaptación metodológica que sienta las bases del nivel de resolución que se requiere para realizar el análisis multicriterio probabilístico para inestabilidad de laderas, así como la estandarización del tipo de resultado que se puede obtener de cada escala de trabajo.

Por otra parte, el uso de los drones como herramienta de apoyo ha iniciado desde los años 70, dentro del área militar (Colomina & Molina, 2014), el abaratamiento del equipo incentivó su uso para disciplinas científicas, generándose apenas 10 artículos para 1990 con temática para manejo de desastres (Gomez & Purdie, 2016)

A escala local, los esfuerzos se concentran en la adquisición de datos, el monitoreo de desplazamientos sobre derrumbes ya acontecidos, con la comparación temporal de modelos de elevación digital (Lucieer, Jong, & Turner, 2014) Con los cuales se han obtenido datos puntuales de seguimiento de fracturas, dirección de flujo y velocidad. Demostrando su eficiencia para el mapeo post-evento, pero ignorando los avances en predicción obtenidos a partir del procesado a escala regional. En este proyecto se pretende implementar una metodología de actualización, que combine los avances en modelación SIG escala regional con lo obtenido a escala local. Combinando los avances de ambas metodologías.

El objetivo de esta investigación es el de para comparar la efectividad y precisión de las ortofotos obtenidas con un (VANT) con respecto a otras metodologías y la posterior estandarización de la metodología de foto-reconstrucción y procesamiento de la información para poder ser comparable con los modelos regionales SIG de zonificación de susceptibilidad a deslizamientos.

Materiales

El equipo utilizado para este estudio está conformado por: un LIDAR terrestre modelo a) Escáner Topcon GLS 1500, el cual cuenta con campo de visión de 360°x270°, alta precisión de hasta 4mm y con capacidad de captura de 30,000 puntos por segundo, efectividad de alcance de 150 hasta 330m el cual pertenece al Departamento de Topografía de la Facultad de Ingeniería Civil (UANL) y b) un VANT de la marca DJI Phantom 3 Professional altura máxima de 6000 msnm, con modo de posicionamiento de GPS/GLONASS, y un tiempo de vuelo estimado de 23 min (por batería/aproximadamente) equipado con una cámara de 12.4M/ FOV 94° (Dji, 2019), c) un DJI Inspire 2, el cual puede elevarse hasta 5000 m con un tiempo de vuelo aproximado de 27 min (por batería/ con Zenmuse X4S) equipado con una cámara Zenmuse x4s, de 20M y FOV 84° y d) adicionalmente, se utilizó una brújula geológica marca Brunton.

Tabla 18. Equipo y dispositivos utilizados para el trabajo de campo.

3. Método

Equipo	Especificaciones
Escáner Topcon GLS 1500	Con campo de visión de 360°x270°, alta precisión de hasta 4mm y con capacidad de captura de 30,000 puntos por segundo, efectividad de alcance de 150 hasta 330m
DJI Phantom 3 Professional	Altura máxima de 6000 msnm, con modo de posicionamiento de GPS/GLONASS, y un tiempo de vuelo estimado de 23 min (por batería/aproximadamente) equipado con una cámara de 12.4M/ FOV 94
DJI Inspire 2	El cual puede elevarse hasta 5000 m con un tiempo de vuelo aproximado de 27 min (por batería) equipado con una cámara Zenmuse X4S, de 20M y FOV 84°
Brújula	Brújula geológica azimuthal, marca Brunton.



Figura 43. Materiales utilizados para el estudio.
Procedimiento fotogramétrico

Uno de los objetivos de este proyecto es la integración de un modelo SIG de alta resolución, para lo cual se obtuvieron datos de campo. Parte de estos datos de campo consisten en la toma de fotografías y videos del sitio de estudio para obtener reconstrucciones 3D. El procesamiento de la información se realizó mediante la técnica fotogramétrica (SFM, Structure from Motion), con una nivelación vertical y la

3. Método

clasificación de puntos para generar el MDE, como puede observarse en el diagrama de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Este procesado consiste en la alineación de imágenes para definir los puntos de coincidencia entre imágenes, Método SIFT (Lowe, 2004), el posicionamiento de estos puntos, a partir de la perspectiva que se genera con respecto a la posición del sensor (en este caso la cámara). Esta nube de puntos media, es rellenada para crear la nube de puntos densa, mediante el método CMVs/PMVS (Furukawa & Ponce, 2010) Para el apropiado manejo de los datos, estos puntos tuvieron que ser nivelados verticalmente, para esto se implementó una normalización con el MDE de INEGI de 5m, el cual esta corregido previamente con la base de datos activa del mismo INEGI). El MDE, es una representación 3D únicamente del terreno, por lo que, para obtenerlo, se tiene que filtrar la nube de puntos corregida, para este proyecto se separó en dos clases, una que contenía todos los puntos referentes al suelo (suelo desnudo, vialidad), y en otra todo lo que no era suelo (casas, autos, vegetación, etc.). Todos los puntos que no pertenecieran a la categoría de suelo fueron eliminados. Con base en estos puntos, se hace una triangulación para obtener las superficies del terreno. Con esta metodología se obtiene el MDE.

Con el fin de obtener reconstrucción completa del área evitando sombras y huecos, el levantamiento se realizó a partir de dos vistas principales. La primera (vista aérea) se realizó con un vuelo aéreo programado utilizando el VANT, el cual hizo el vuelo con la cámara vertical con vista al nadir, directamente sobre el suelo. Con este vuelo se consiguió la información de elevación del terreno y objetos de la superficie, lo que se utiliza para generar un Modelo Digital de Superficie (MDS). Las imágenes obtenidas contienen información GPS, de tal modo que el modelo resultante esta referenciado espacialmente.

La segunda vista (oblicua), correspondiente a la vista terrestre, se obtuvo a partir de un vuelo realizado a lo largo de la ladera, con la cámara fija de manera horizontal, haciendo algunos enfoques, acercamientos y complementando con algunas vistas aéreas donde se registrara una falta de datos del vuelo aéreo programado. Para este levantamiento, la cámara se colocó alrededor de los 45° con respecto a nadir. Los videos fueron posteriormente seccionados en fotografías, las cuales no contaban con información de referencia. La referencia de las nubes de puntos terrestres se realizó tomando como base el vuelo aéreo, alineando las imágenes con puntos de coincidencia entre ambas tomas.

Para obtener la ortofoto digital, se utiliza como base el archivo de superficies, sobre él se imprime la “textura” del terreo, que proviene de la transferencia de color de la imagen sobre la superficie coincidente espacialmente. Tanto el MDE como la ortofoto, tienen que ajustarse para estandarizar la resolución del trabajo de campo, por lo que se

3. Método

realiza un re-muestreo de la información, de tal manera que todos los datos resultantes se delimiten por un tamaño de pixel de 10 cm.

Procedimiento LIDAR

Este método realiza la reconstrucción digital de los objetos a través de tecnología láser. El sensor LIDAR proyecta un rayo láser (Infrarrojo) que incide sobre algún objeto y entonces es regresado al aparato, el sensor proyecta este punto en base al tiempo que tarda el rayo en regresar. El resultado es una nube de puntos que se encuentra escalada con respecto al aparato, para referenciarla espacialmente se utilizó como base la nube de puntos generada durante las misiones aéreas provenientes del VANT, referenciando con base en puntos en común entre ambas nubes.

Procesado de datos geológicos en campo

Para la obtención de los datos estructurales se utilizó la regla de la mano derecha, la cual consiste en la toma del rumbo colocar la brújula azimutal de tal forma que la pínula indique hacia la derecha en el sentido del estrato y medir entre 0° y 360°; posteriormente se mide el buzamiento perpendicularmente a la línea del rumbo entre 0 y 90°. Para representar gráficamente estas orientaciones, se utilizaron proyecciones estereográficas, la cual despliega los datos recopilados para el reconocimiento e interpretación de modelos de orientación preferencial (Lisle & Leyshon, 2004; Twiss & Moore, 1992).

3. Método

3.4.1 Validación de geometría

Como parte adicional del presente proyecto, y como una manera de validar el procedimiento posterior que se llevaría a cabo para la toma de datos de campo, se realizó un ejercicio de validación sobre las reconstrucciones digitales 3D obtenidas por VANT y LIDAR, para obtener la precisión se comparó esta información, con datos tomados en campo basados en la metodología tradicional con una brújula geológica.

Las nubes de puntos fueron procesadas utilizando el software CloudCompare, a través del plugin *Facet/Fracture detection* (Dewez, Girardeau-Montaut, Allanic, & Rohmer, 2016), lo que realiza este proceso es detectar todas las facetas presentes en la nube, cada faceta es una cara en la estructura, son puntos que comparten la misma orientación dentro de un rango, cuando se sobrepasa ese rango se genera otro polígono que corresponde a otra faceta. Obtenidas las facetas estas toman la referencia espacial de la nube de puntos, cada polígono tiene información sobre la dirección en la que están buzando con respecto al norte y su inclinación con respecto a un plano horizontal. Los datos se obtuvieron en formato .csv (comma-separated values) para ser procesados en el programa Stereonet.

El análisis de los datos estructurales se llevó a cabo usando el programa Stereonet versión 8 de Allmendinger (Allmendinger, Cardozo, & Fisher, 2012). Los resultados de los buzamientos se representan como polos de los planos o taludes y mediante contornos de densidad; así como los planos de rumbo se ajustan a un Plano principal (P.p) que contenga mejor a los polos de los buzamientos graficados. Para medir la consistencia en los datos tomados, se calculó el valor de correlación (v.c.), en donde mientras el valor sea más cercano a 1, los datos tenderán a tener mayor correspondencia en las orientaciones de los taludes. Estos datos se graficaron en el hemisferio inferior de la proyección de Schmidt.

Sitios de prueba

Se registraron dos sitios de entrenamiento ubicados en el cerro de la corona, perteneciente al Area Metropolitana de monterrey, los cuales fueron nombrados como Ladera Chipinque y Ladera San Patricio.

Ladera Chipinque

Esta ladera se localiza al SE del Cerro de La Corona, en las coordenadas UTM 14R 363585.49 E y 2835565.05 N, Zona 14 N; en donde el corte de la roca está formado por lutitas variando de color de café ocre por intemperismo a gris claro en muestra fresca. Esta ladera está formada por lutitas y calizas, en donde se tomaron 72 datos de talud a lo largo de 240 metros de ladera expuesta. Como se observa en la Figura 45; las estructuras geológicas presentan una dirección promedio de estratificación con rumbo y buzamiento en 310/30, y con un talud en 209/80 bidireccional y planos de foliación con

3. Método

rumbo de 180/81 que cortan a la estratificación; y fracturas conjugadas con direcciones 120/80 y 330/80.



Figura 44 A) Ladera Chipinque formada por lutitas foliadas. B) Estructuras geológicas medidas en el talud: (líneas verdes), foliación (líneas rojas) y talud (polígono amarillo). C) Aproximación al talud (polígono amarillo), en donde se observa las distintas orientaciones del fracturamiento de la lutita. (Ramírez, 2019).

El levantamiento realizado por el dron en esta ladera obtuvo 1341 datos de taludes. El resultado fue ingresado al programa Stereonet, en donde se obtuvo una orientación promedio en el Plano principal de 208/42 y con un v.c. de 0.53,

3. Método

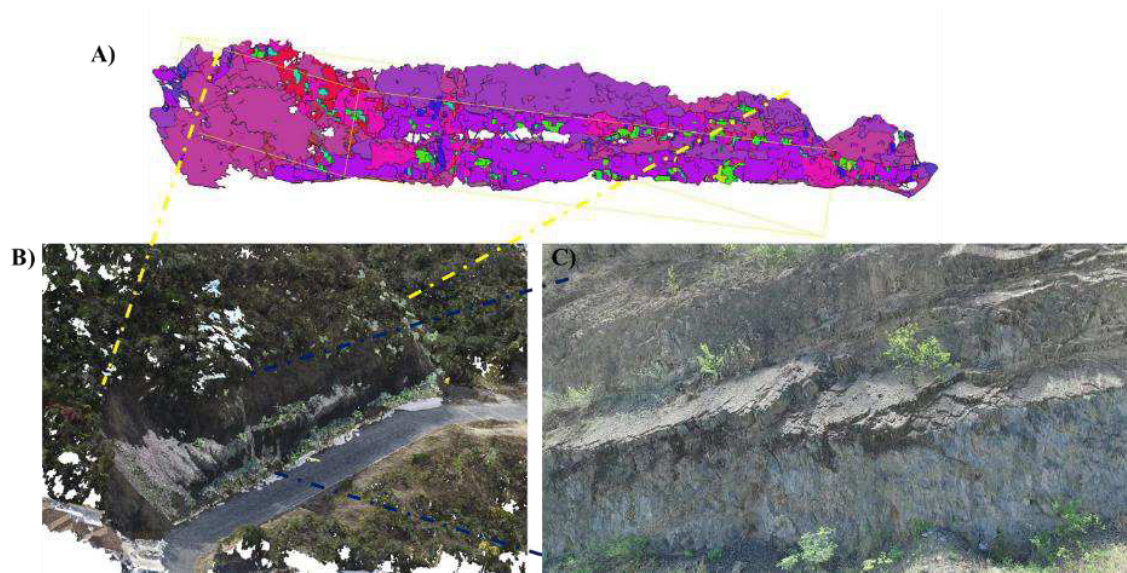


Figura 45. A) Reconocimiento de facetas de la ladera Chipinque en el programa CloudCompare. B) nube de puntos obtenida a partir de 42 fotografías tomadas mediante el VANT (dron) y C) Imagen real del talud expuesto. (Ramírez, 2019).

La Ladera San Patricio

Se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 14R 364487.85 E y 2836189.20 N Zona 14 N (Figura 46), en donde las rocas están formadas por lutitas calcáreas de intemperismo grisácea oscura a verde y grisácea en roca fresca. En esta ladera se tomaron 44 datos de talud a lo largo de 30 metros de ladera expuesta. El rumbo del talud presenta una orientación de 317/63 con inclinaciones hacia el NE que van de 36 a 88°. La orientación de los estratos presenta un P.p. en 311/36 hacia la misma inclinación del corte de talud, por lo que lo vuelve inestable al tener la misma dirección de inclinación al corte. Los datos tomados de foliación presentan un P.p. en 131/80 con inclinaciones hacia el SW.

3. Método



Figura 46 A) Estructuras geológicas medidas en campo para Ladera San Patricio, como lo son talud (polígono amarillo), estratificación (T), fracturas (líneas verdes). B) Talud de Ladera San Patricio donde se observa el constante desprendimiento de rocas del talud (polígonos azules).

Resultados de la validación

Ladera Chipinque: Los resultados muestran un Plano Principal (P.p.) con una orientación de rumbo y buzamiento en 209/80 y con un valor de correlación (v.c.) de 0.7880. Los polos de los buzamientos muestran una dispersión de orientaciones hacia el NW y SE en las gráficas de Schmidt, debido a las bidirecciones de los taludes en ambas orientaciones.

Ladera San Patricio: Los estereogramas de Schmidt obtenidos de los datos manuales, se observa un P.p. con dirección de rumbo y buzamiento en 317/61 (Figura 47), y con un v.c. de 0.9011.

3. Método

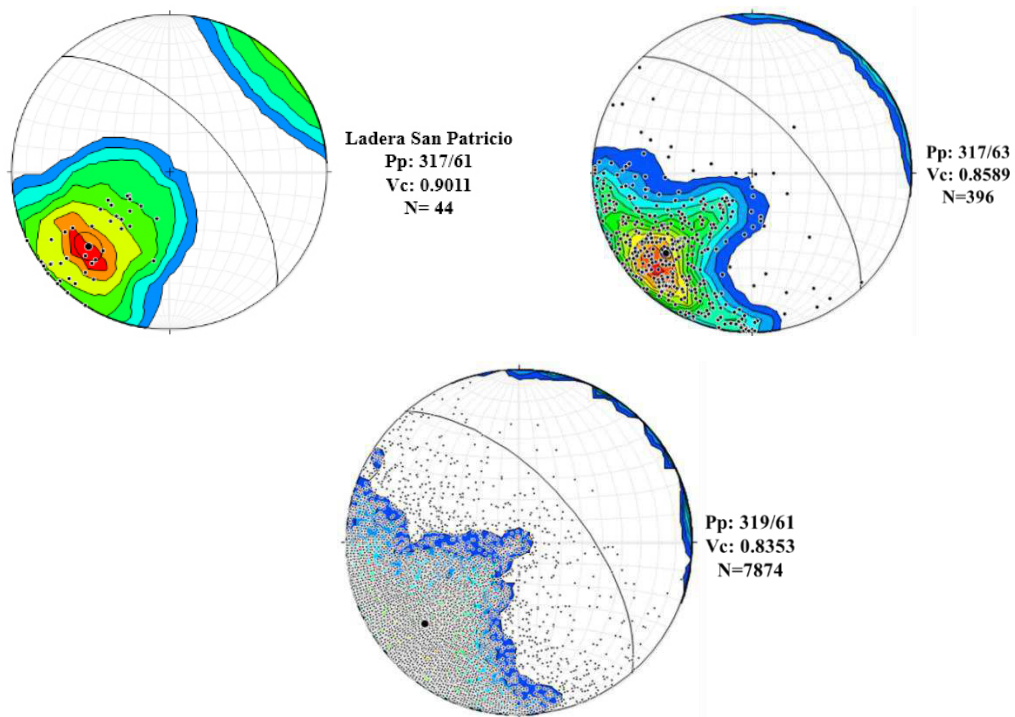


Figura 47. Resultados obtenidos para la ladera San Patricio. Estereograma de Schmidt obtenido con el método tradicional (a) las nubes de puntos generadas por los sensores remotos b y c.

Conclusiones del ejercicio

Durante las pruebas se registraron dos conclusiones principales, por un lado, la automatización de la toma de información puede causar sesgos que requieren de un filtrado específico futuro, uno de estos inconvenientes es el sesgo del valor de correlación originado por la gran cantidad de datos dispersos con respecto a los taludes de orientaciones similares, esto es; un talud de 2 m de largo, recibe el mismo peso como faceta que un talud de 0.30 m. Un gran plano, tendría menos peso en un análisis de frecuencia de datos, aunque abarque un espacio mayor, lo cual puede reconocerse por la metodología tradicional por medio de la experiencia del usuario. Por otro lado, el archivo que se genera mediante las técnicas de percepción remota, permiten conservar el archivo digital del cual se tomaron los datos, como una representación de alta correlación con el ambiente real, del cual se pueden realizar más estudios posteriores, aun y cuando el sitio de estudio haya sido modificado.

Los tres métodos son consistentes entre sí, obteniendo resultados promedio con alta correlación, los datos tienen la misma utilidad que se puede esperar del trabajo realizado de manera tradicional. Esta información, sirve para definir la geometría que rige la relación entre el escarpe, o la ladera, con respecto a la inclinación de las capas litológicas, lo que permite caracterizar un sitio con respecto al porcentaje de estabilidad

3. Método

de una ladera. Aunque, la información LIDAR ofrece resultados más precisos y con mayor detalle, el promedio obtenido a diferentes niveles de resolución, es altamente similar, en este caso es del 80 % con respecto a la información fotogramétrica. Sin embargo, la información fotogramétrica se obtiene a un menor costo en una menor cantidad de tiempo y debido a que cuenta con una menor cantidad de datos con respecto a la técnica LIDAR, también se facilita el procesamiento posterior de la información.

Por lo anterior se justifica que para el trabajo de campo realizado para el presente proyecto, solo se implementa la técnica fotogramétrica como método de obtención de reconstrucciones a nivel específico.

3.4.2 Procesamiento del trabajo de campo

Sitios de estudio

De acuerdo a los resultados del Modelo SIG para zonificación de susceptibilidad de laderas se determinaron algunos sitios de interés, ya que presentaban áreas donde existen viviendas y que debido al manejo en la urbanización, se encuentran ubicadas a unos metros de material rocoso expuesto. Estos sitios fueron evaluados en campo, el objetivo fue obtener información de terreno para validar los resultados obtenidos con los modelos y realizar un levantamiento LIDAR terrestre para obtener información detallada de los echados utilizando Modelos Digitales de las laderas expuestas, la metodología fue ajustada debido a las condiciones de terreno, accesibilidad y seguridad. En todos los sitios, se llevó a cabo una metodología para la obtención de datos digitales, así como datos geológicos de campo en donde fue posible acceder.

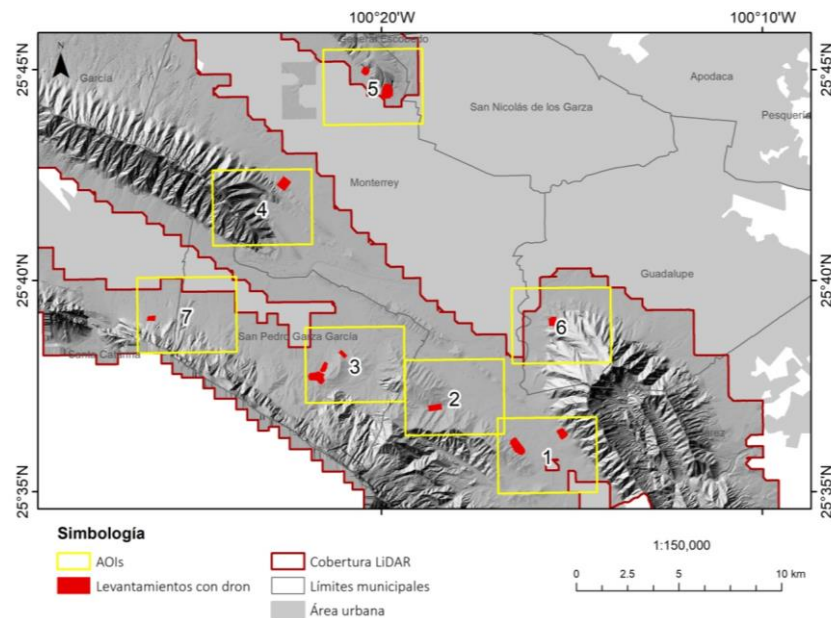


Figura 48. Sitios de muestreo para el trabajo de campo.

3. Método

Propuesta metodológica

Con el objetivo de homologar las diferentes escalas de insumos utilizadas en un modelo SIG de susceptibilidad, es necesaria la estandarización de la información que se implementa. Para ello, se propone el modelo de flujo presentado en la Figura 49, en donde se concentra el pre-procesado fotogramétrico descrito anteriormente, del cual se obtiene la nube de puntos, que es un conjunto de los vértices con información XYZ que delimitan el sitio de estudio en 3 Dimensiones. Estos puntos se segregan para utilizar únicamente las que corresponden al suelo. Los nodos resultantes se triangulan para la creación de superficies que conformaran el MDE. El MDE es corregido geoméricamente, tanto espacial como verticalmente, conforme al MDE de 1m, el cual a su vez ha sido previamente corregido conforme a la red geodésica Nacional de INEGI. Sobre la triangulación corregida se imprime la coloración obtenida de las fotografías, asignando la textura que se refleja en el ortomosaico del sitio. La Ortofoto Digital y el MDE, son remuestreados a 0.1 m, para ser equiparables con los insumos previamente utilizados en los Modelos SIG de diferentes escalas.

Procesado de los levantamientos en sitio

En total se registraron 11 levantamientos, dentro de los cuales se registraron 38 puntos de control. Estos puntos sirvieron como base para geo-referenciar los datos en algunos casos y realizar un ajuste geométrico vertical como parte del proceso metodológico.

Tabla 19. Cantidad de puntos obtenidos con fotogrametría, cantidad de puntos que correspondían a la categoría de suelo, utilizados para generar los MDE y el porcentaje de puntos que fue filtrado durante el procedimiento.

ID	Cerro	ID	vuelo	Fecha	Cantidad de puntos	Puntos de suelo	% filtrado
1	SMO	Corona 1	1	25/02/2016	21669020	8944707	58.7
1.2	SMO	Corona 1	2	06/04/2017	12037776	7384443	38.7
2	SMO	Corona 2	2	24/02/2016	21668916	5289560	75.6
2.2	SMO	Corona 2	2	06/04/2017	12037718	4596316	61.8
3	Mitras	Mitras	1	22/11/2018	4807566	2395413	50.2
3.2	Mitras	Mitras	2	22/11/2018	34290941	13454983	60.8
4	Silla	silla/parque	1	03/03/2016	4099782	2391402	41.7
5	Silla	Silla/águilas	1	19/01/2019	16221544	12193805	24.8
6	SMO	Sonoma	1	14/02/2018	18128038	10319452	43.1
7	SMO	Tanques	1	13/02/2018	25534710	11909708	53.4
8	Topo Chico	Topo chico 1	1	18/02/2016	1593308	1212567	23.9
9	Topo Chico	Topo chico 2	2	16/02/2016	3030628	2071107	31.7
10	SMO	Alpino	1	09/10/2018	28911130	15473112	46.5
11	SMO	Sta Catarina	1	22/01/2019	16221544	12193805	24.8

3. Método

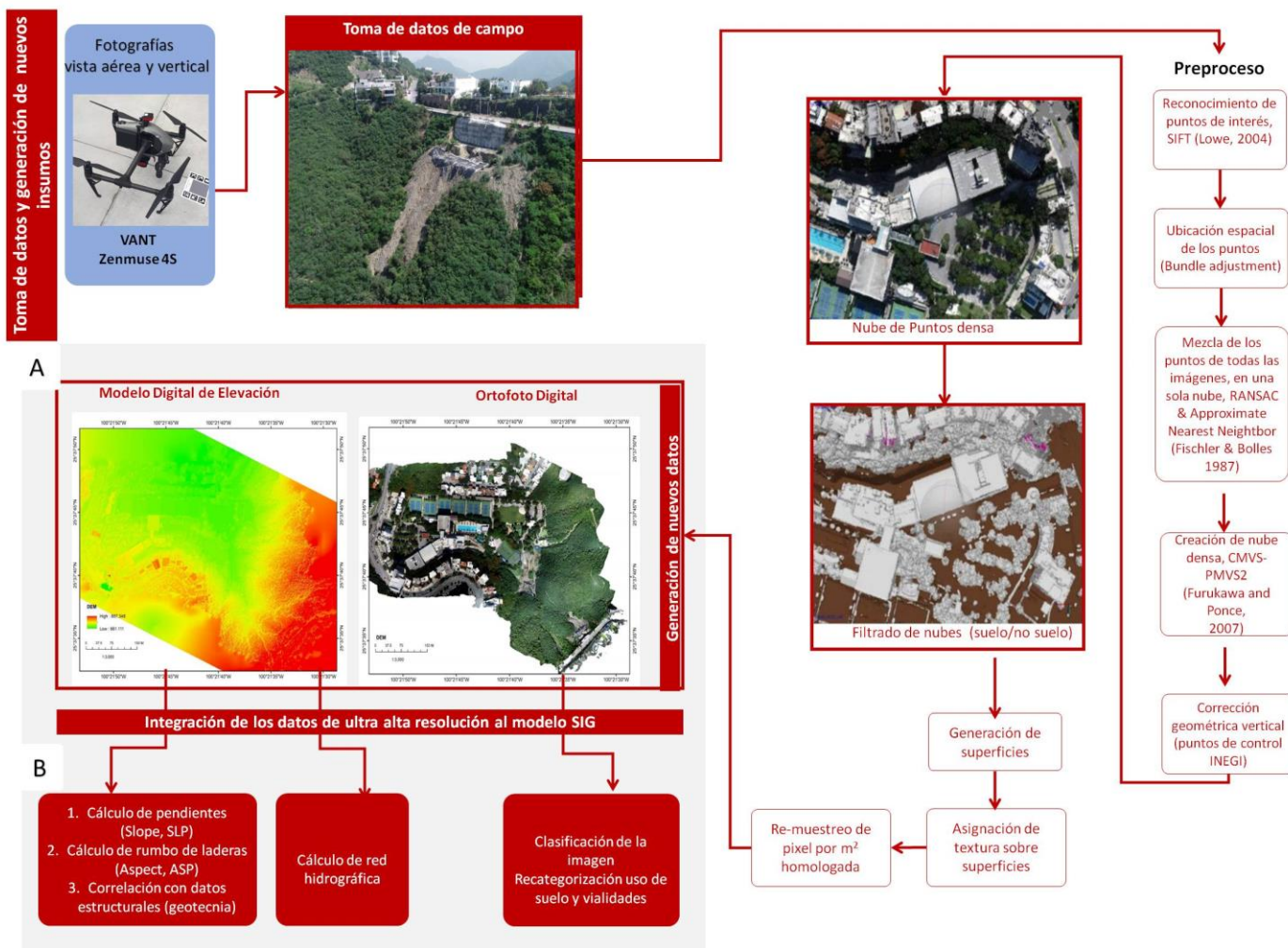


Figura 49. Diagrama de la metodología propuesta en este proyecto para el procesado de los datos de campo (Elaboración propia).

3. Método

En la siguiente sección, se desglosa el procesamiento de cada uno de los 11 levantamientos realizados para el presente proyecto, conforme a los siguientes 7 incisos.

- E. Punto de ubicación de la cámara al momento de tomar la fotografía y traslape entre imágenes.
- F. Ubicación de puntos de control para corrección geométrica.
- G. Puntos de ubicación de la cámara al momento de tomar la fotografía y el ajuste de cada punto por corrección geométrica.
- H. Residual de imágenes producto de la calibración de la cámara.
- I. Clasificación de nube de puntos, los puntos correspondientes al suelo se presentan en color café.
- J. Modelo de Elevación resultante de la triangulación de los puntos que corresponden al suelo.
- K. Ortomosaico resultante del área de estudio.

3. Método

Sitio 1

ID Corona 1

Información: Cobertura de 8.05 ha, 44 fotos, 44 alineadas, 3 puntos de control, 89.4 altura de vuelo, 7.01 cm/pix de resolución.

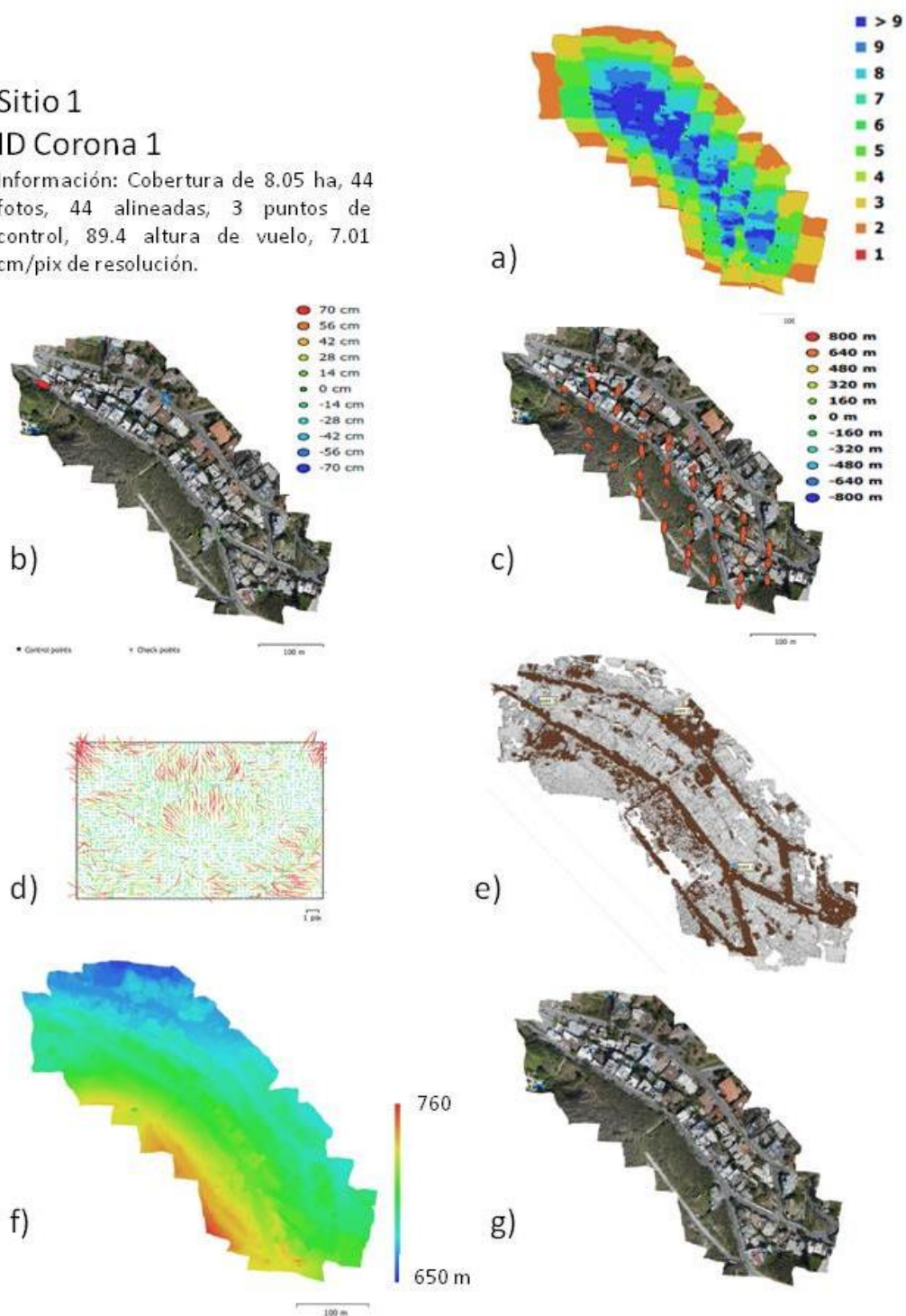


Figura 50. Reporte de procesado del sitio 1.

3. Método

Sitio 2

ID Corona 2

Información: Cobertura de 5.26 ha, 41 fotos, 41 alineadas, 3 puntos de control, 93 altura de vuelo, 13.9 cm/pix de resolución.

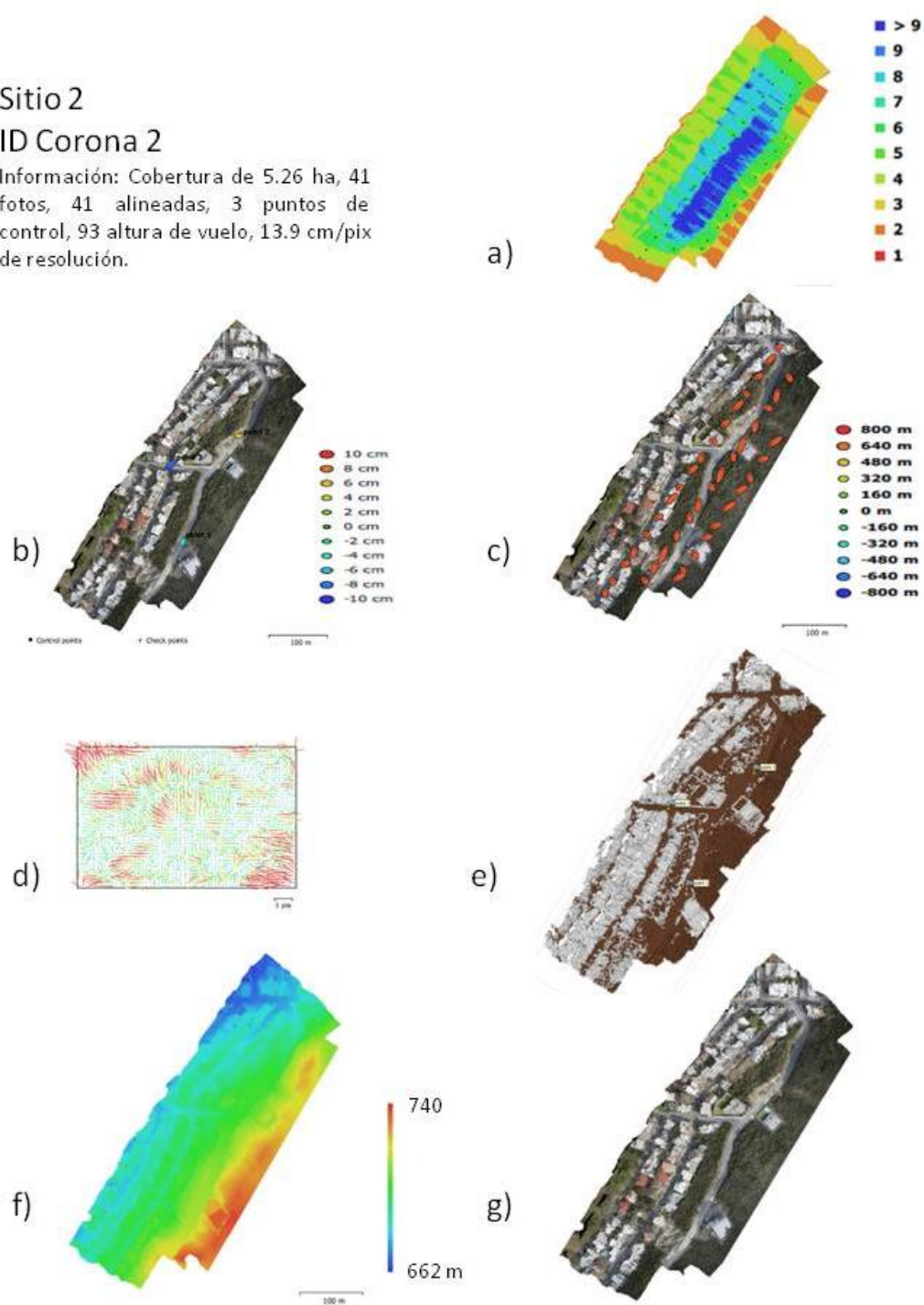


Figura 51. Reporte de procesamiento del sitio 2

3. Método

Sitio 3

ID Mitras

Información: Cobertura de 19.58 ha,
215 fotos, 190 alineadas, 3 puntos de
control, 113 altura de vuelo, 4.72
cm/pix de resolución.

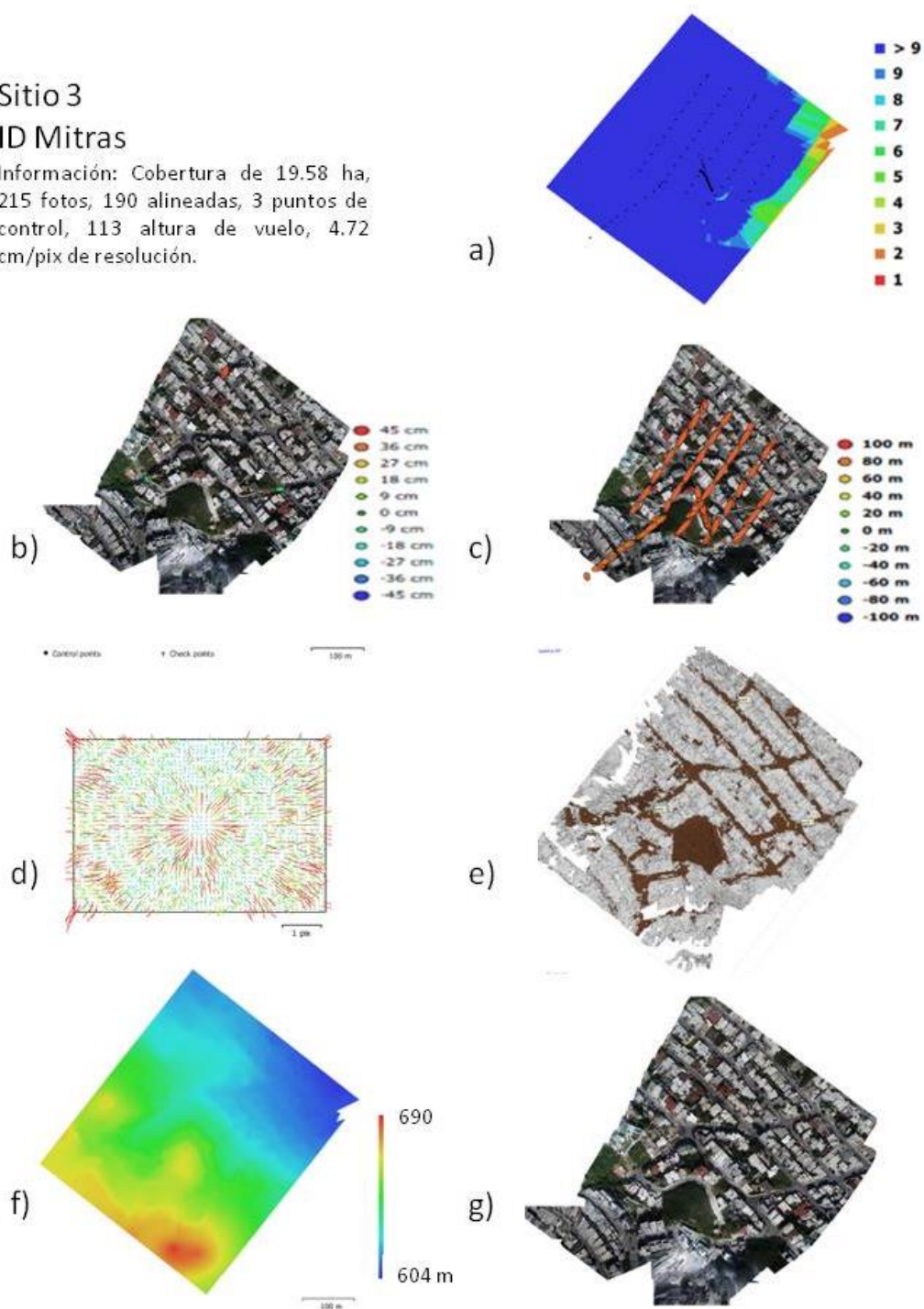


Figura 52. Reporte de procesado del sitio 3.

3. Método

Sitio 4

ID Silla/Parques

Información: Cobertura de 13.53 ha, 28 fotos, 28 alineadas, 3 puntos de control, 133 altura de vuelo, 19.6 cm/pix de resolución.

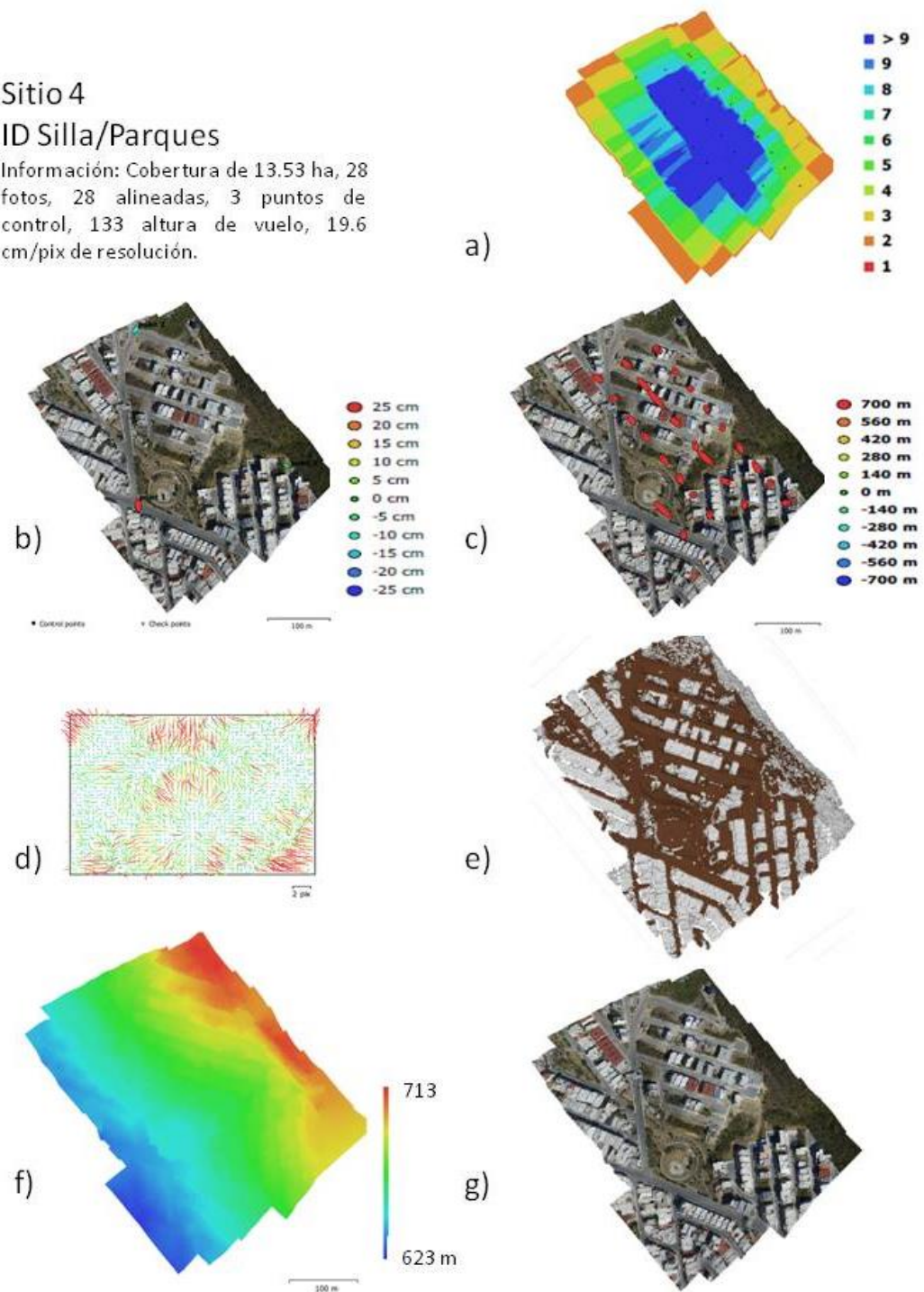


Figura 53. Reporte de procesado del sitio 4

3. Método

Sitio 5

ID Silla/Águilas

Información: Cobertura de 11.44 ha,
206 fotos, 200 alineadas, 3 puntos de
control, 85.7 altura de vuelo, 6.74
cm/pix de resolución.

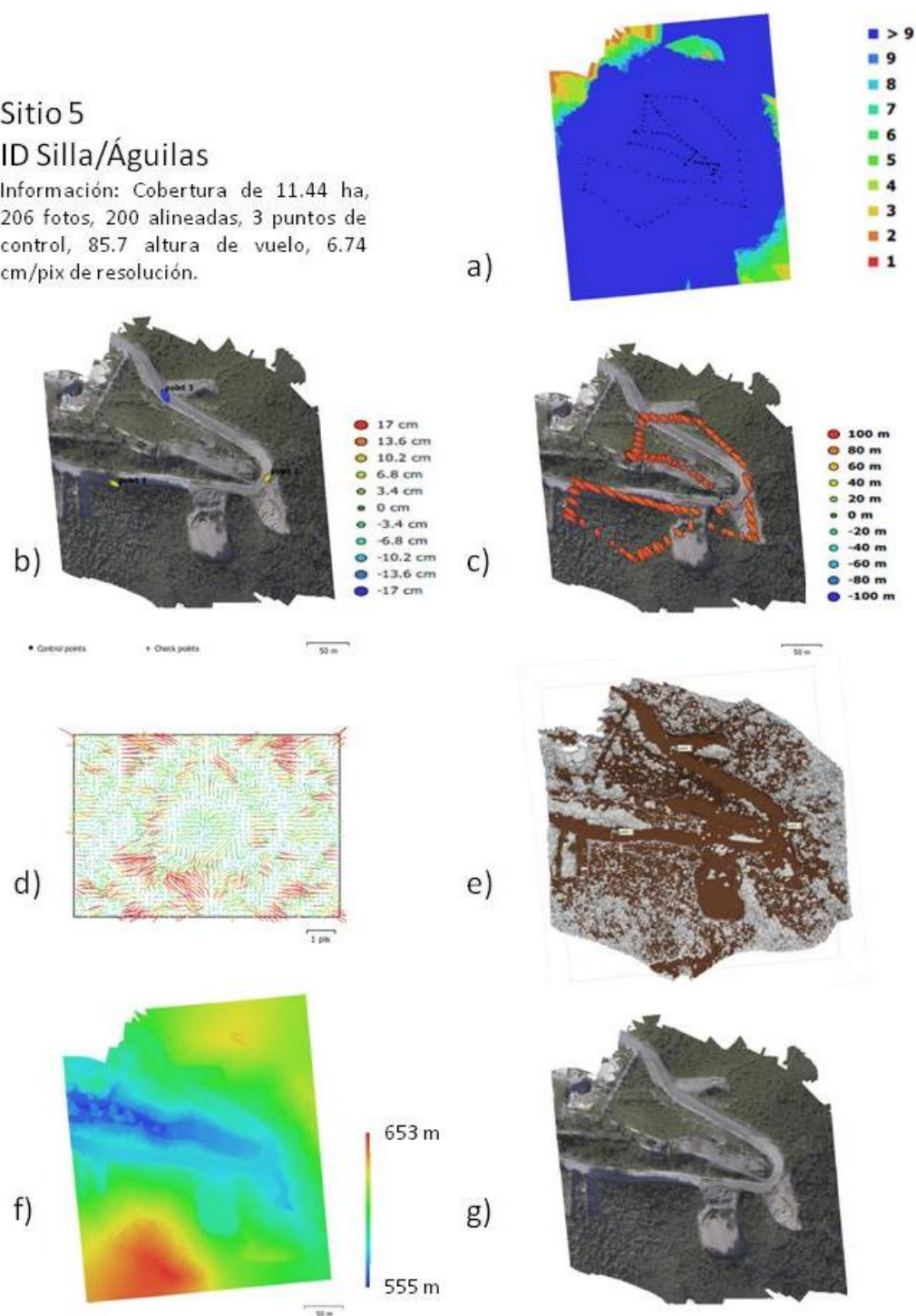


Figura 54. Reporte de procesado del sitio 5.

3. Método

Sitio 6

ID Sonoma

Información: Cobertura de 13.8 ha, 282 fotos, 238 alineadas, 3 puntos de control, 88.6 altura de vuelo, 8.74 cm/pix de resolución.

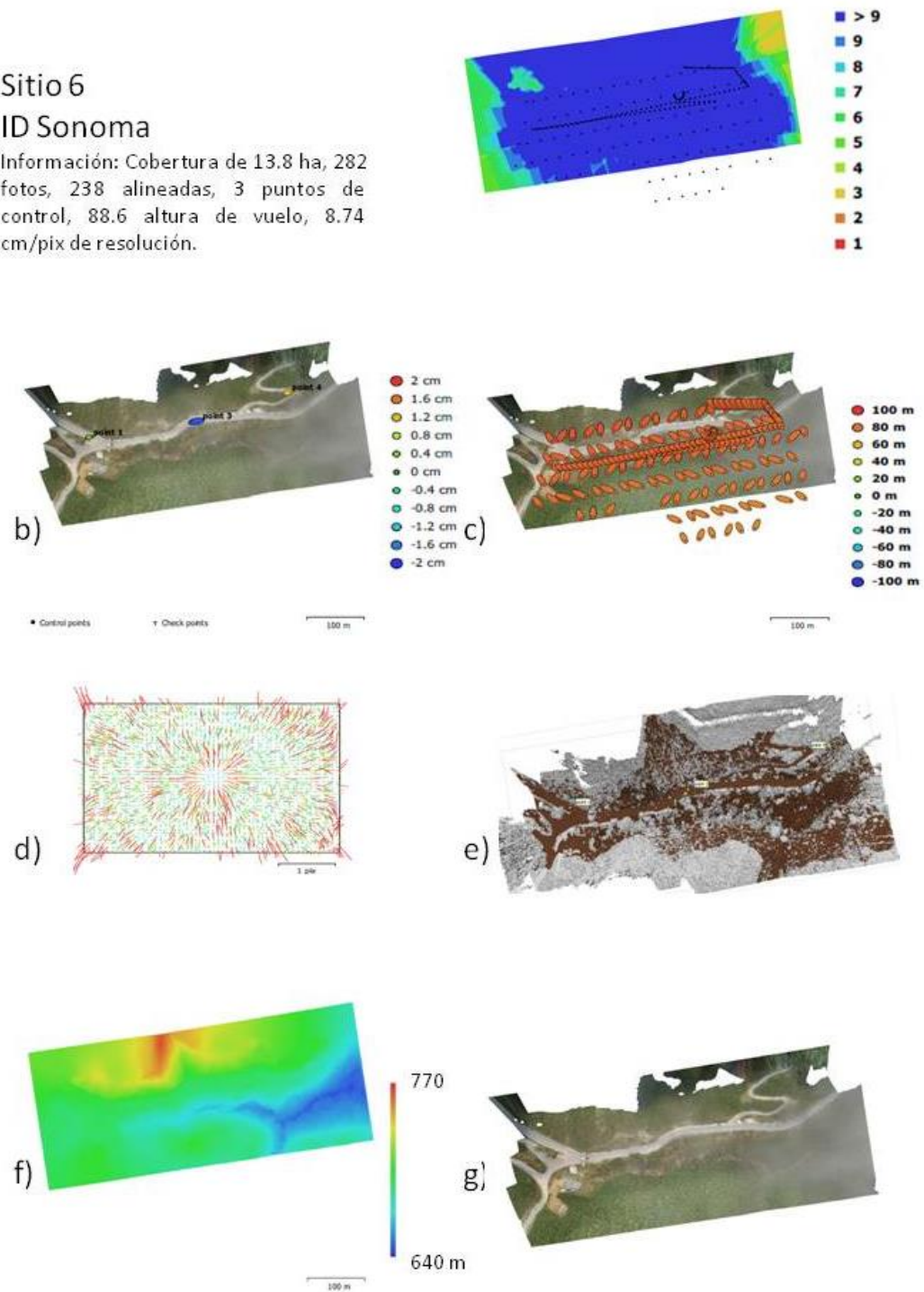


Figura 55. Reporte de procesamiento del sitio 6.

3. Método

Sitio 7

ID Tanques

Información: Cobertura de 26.75 ha,
209 fotos, 206 alineadas, 3 puntos de
control, 114 altura de vuelo, 11.7
cm/pix de resolución.

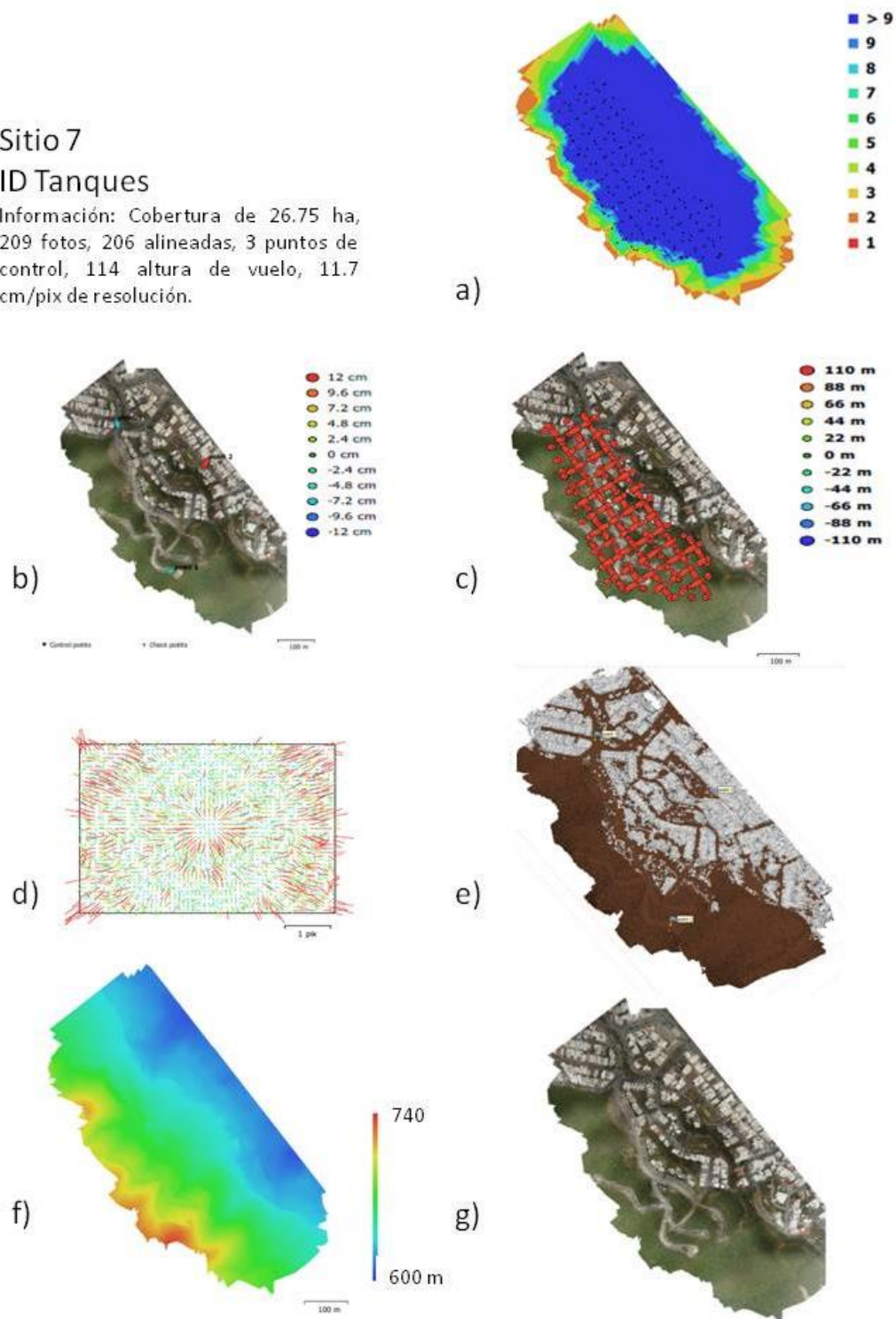


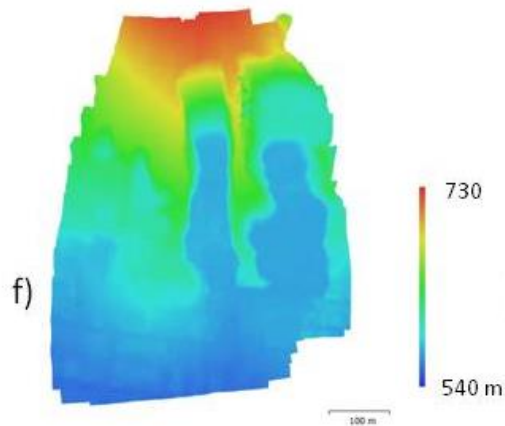
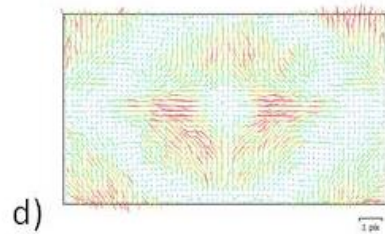
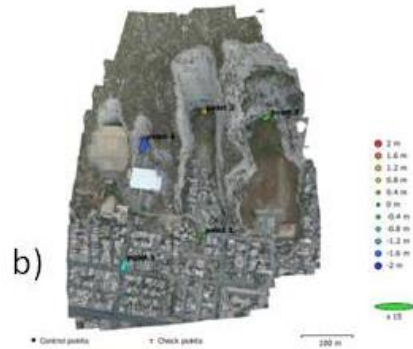
Figura 56. Reporte de procesamiento del sitio 7.

3. Método

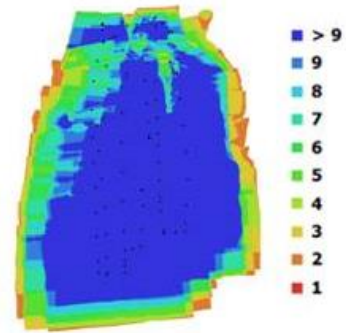
Sitio 8

ID Topo Chico 1

Información: Cobertura de 26.28 ha,
100 fotos, 100 alineadas, 5 puntos de
control, 150 altura de vuelo, 47.3
cm/pix de resolución.



a)

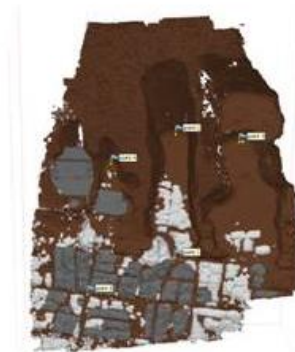


N/A

c)

La reconstrucción se realizó a partir de la segmentación de un video, por lo que las imágenes no estaban georreferenciadas.

e)



g)



Figura 57. Reporte de procesado del sitio 8.

3. Método

Sitio 9

ID Topo Chico 2

Información: Cobertura de 8.25 ha, 32 fotos, 31 alineadas, 3 puntos de control, 121 altura de vuelo, 16.9 cm/pix de resolución.

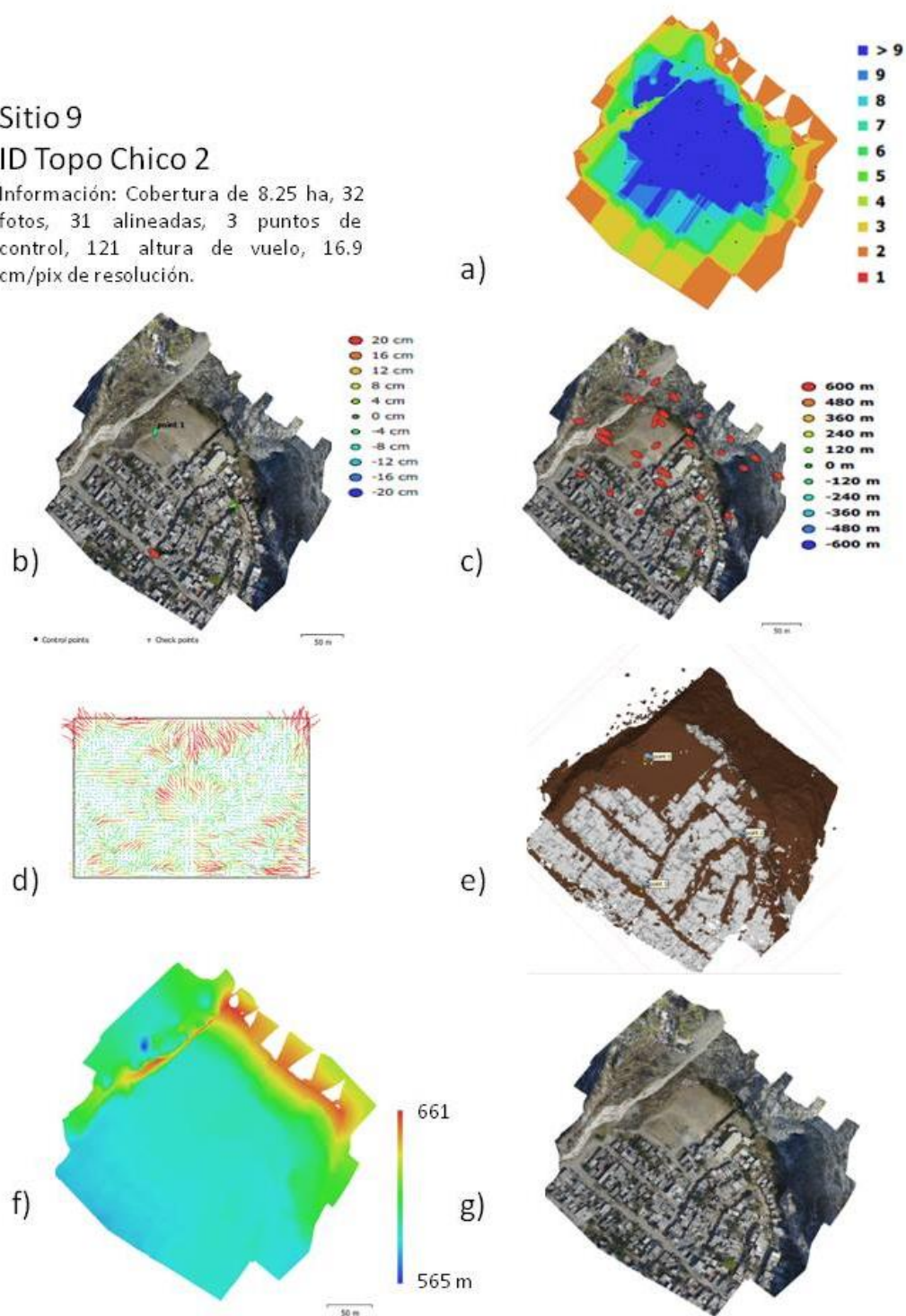


Figura 58. Reporte de procesado del sitio 9.

3. Método

Sitio 10 ID Alpino

Información: Cobertura de 24.6 ha, 302 fotos, 284 alineadas, 6 puntos de control, 115 altura de vuelo, 5.75 cm/pix de resolución.

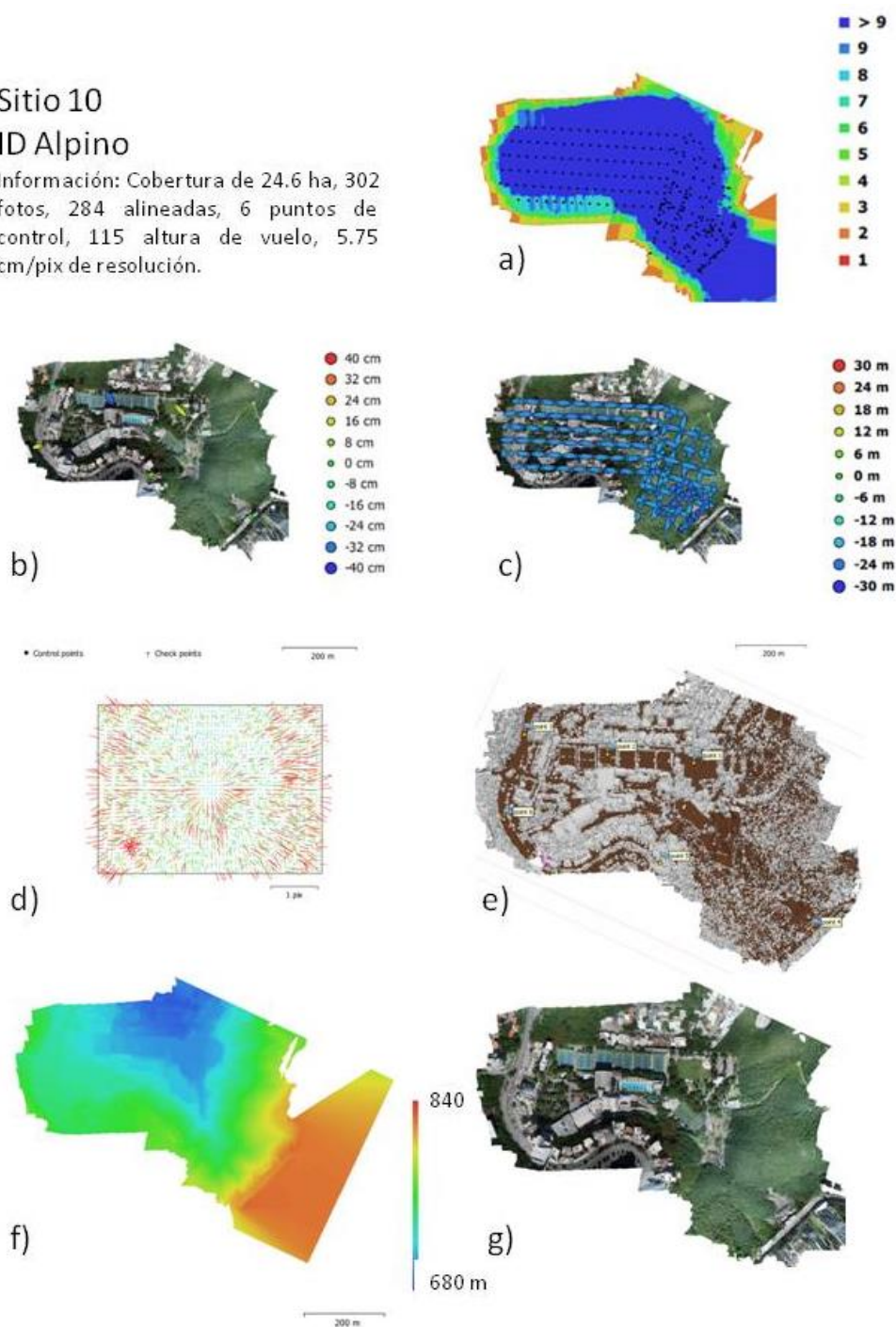


Figura 59. Reporte de procesamiento del sitio 10.

3. Método

Sitio 11

ID Santa Catarina

Información: Cobertura de 6.58 ha, 71 fotos, 71 alineadas, 3 puntos de control, 59.9 altura de vuelo, 6.6 cm/pix de resolución.

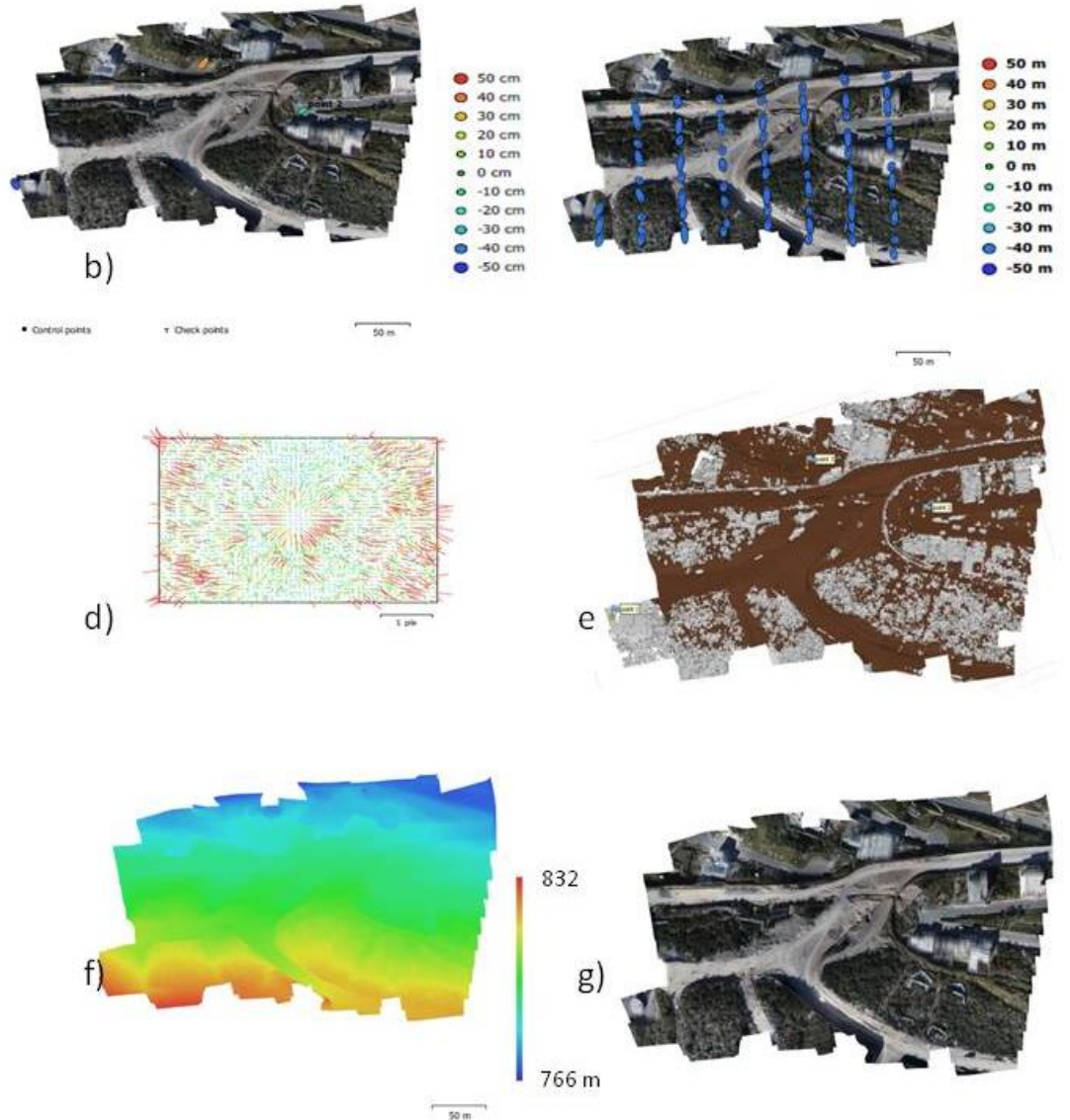


Figura 60. Reporte de procesado del sitio 11.

4 RESULTADOS

4.1 Modelo SIG

Como resultado se obtuvo un mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas que cubre una porción de la Sierra Madre Oriental, el cual toma en consideración los factores de cobertura de uso de suelo, tipo de roca, lineamientos de roca, fallas, datos de estratificación de la roca, lineamientos de arroyos y carreteras. Cada pixel dentro de la imagen resultante representa la suma del estado de estabilidad o susceptibilidad que aporta al modelo cada uno de los factores. Entre mayor sea la cantidad de factores con un alto grado de susceptibilidad dentro de un mismo pixel, más probable se vuelve la posibilidad de un deslizamiento de la ladera.

Los resultados del mapa de zonificación para 1m muestran que el mayor porcentaje de cobertura se obtuvo para la categoría de susceptibilidad alta, mientras que para la modelación obtenida con el MDE de 5m, son las categorías de susceptibilidad “Media” y Alta”. El promedio de porcentaje de coincidencia entre ambos modelos es de 30%. Los mapas resultantes se muestran a continuación. La categoría con mejor definición (porcentaje de traslape entre ambos modelos) es “Muy Alto” con el 40 %. Estos valores son preliminares, y demuestran, inclusive visualmente la coincidencia de las zonas que se encuentran en un nivel de susceptibilidad muy alto, con variaciones entre alto y medio. Pero se muestra una mejor definición por parte del modelo a 1m, con un resultado más limpio, y mejor delimitado. Un ejemplo de ello es el sitio 5, que para el modelo de 1m mantiene el mayor porcentaje de cobertura en grado Medio, escalando a alto precipitadamente en las zonas de pendiente abrupta, generadas por la extracción del material, mientras que el modelo a 5m conserva zonas catalogadas con muy baja probabilidad dentro de la parte alta de la montaña. Por lo que es necesario realizar un estudio espacial para correlacionar los sitios específicos en donde ya se tienen deslizamientos con respecto al resultado de coberturas categorizado por Modelo para determinar un grado de confianza.

Tomando en cuenta ambas escalas, los resultados indican que más del 70% (322.7 km^2) del terreno estudiado se encuentra entre las categorías Medio a Muy alto, de las cuales, entre el 27 y 30% corresponden a la categoría de Alta probabilidad y entre el 18 y el 19% corresponden a la categoría de Muy alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, como se muestra en la Tabla 20.

4. Resultados

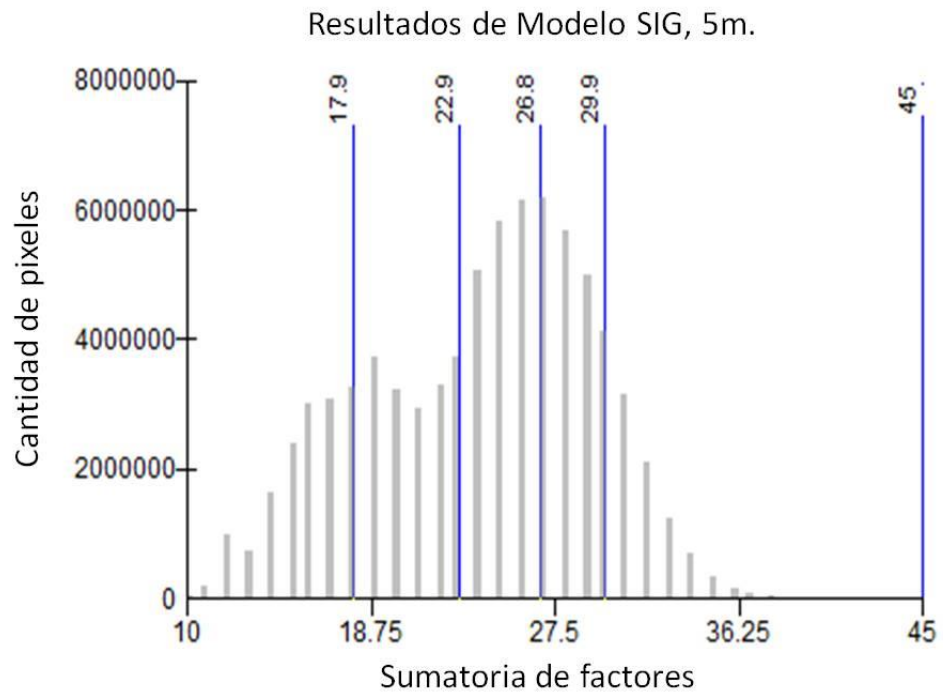


Figura 61. Gráfico de frecuencia de pixeles por categoría para el Modelo SIG a 5 m, clasificación por el método de Jenks, 2006.

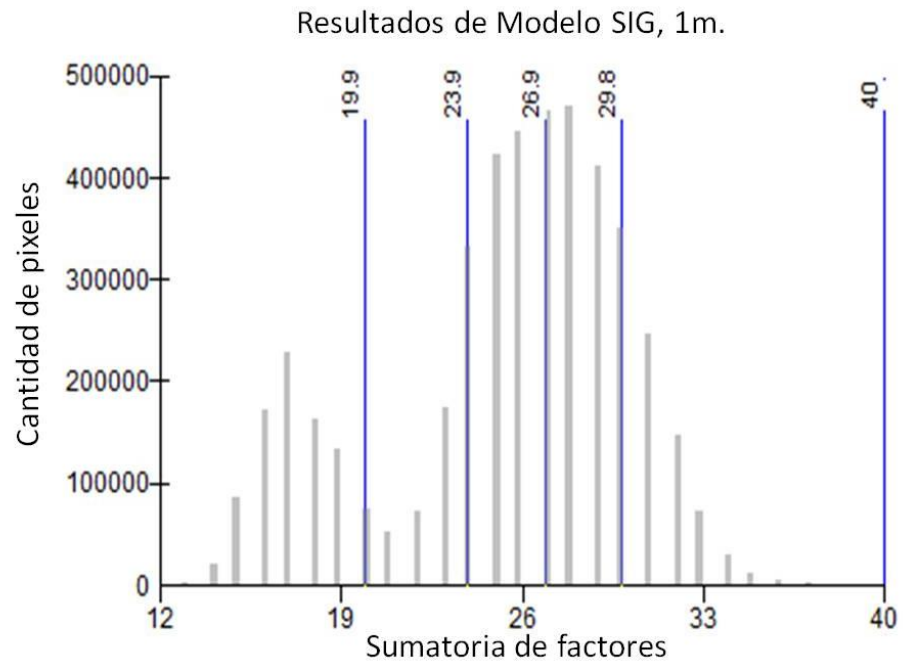


Figura 62. Gráfico de frecuencia de pixeles por categoría para el Modelo SIG a 1 m, clasificación por el método de Jenks, 2006.

4. Resultados

Tabla 20. Resultados de cobertura por nivel de zonificación (Área en Km²).

ID	nivel	1m	%	5m	%	Traslape	%
1	Muy Bajo	89.1	19.3	41.5	9.0	20.7	23.3
2	Bajo	29.4	6.4	76.2	16.5	9.7	12.7
3	Medio	118.3	25.6	126.4	27.4	49.5	39.1
4	Alto	140.6	30.5	125.8	27.3	49.5	35.2
5	Muy Alto	84.3	18.3	91.1	19.8	36.8	40.4
	Total	461.7	Total	461.0		Promedio	30.1

Modelo SIG 1 m

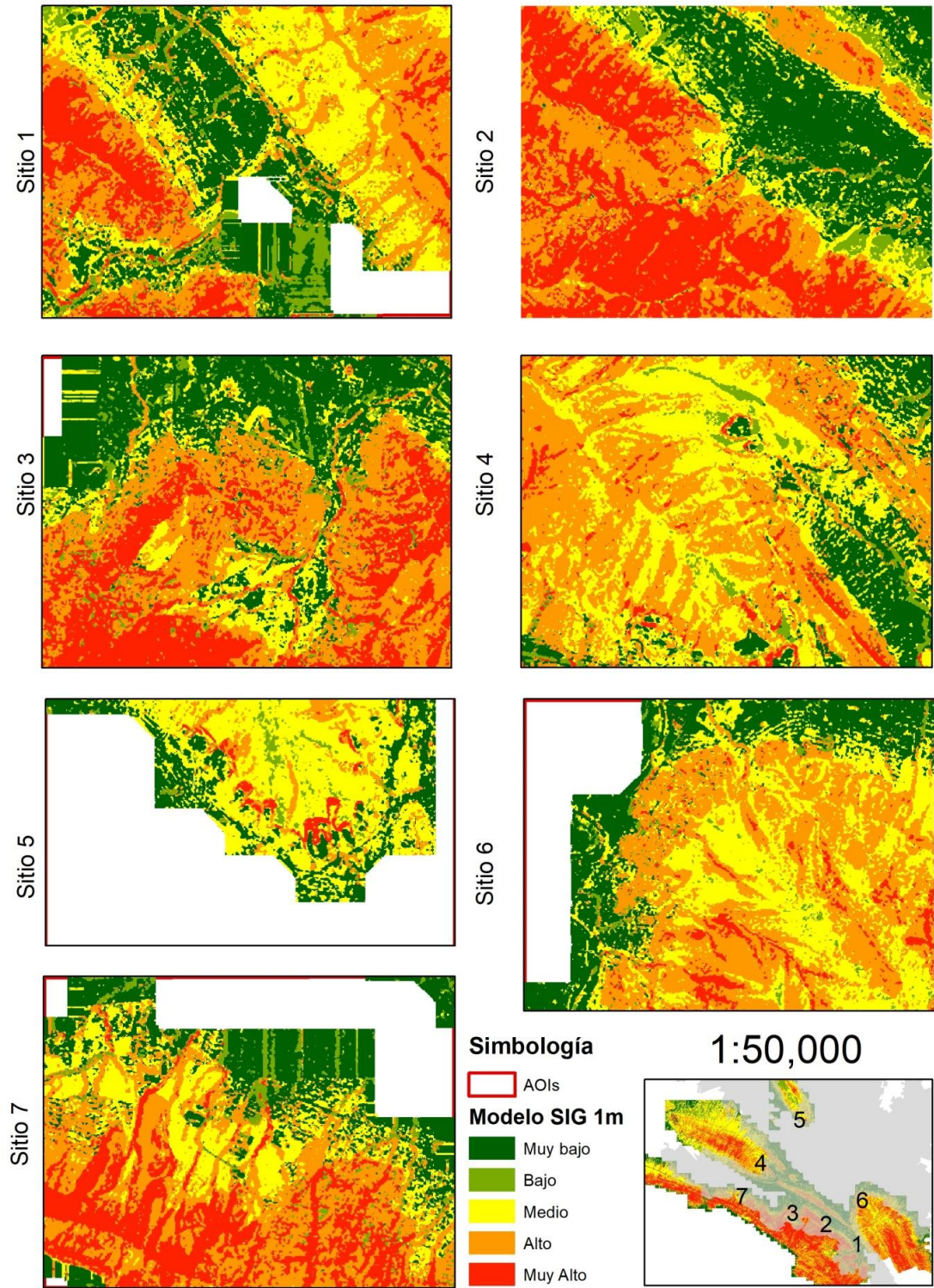


Figura 63. Resultado de modelación SIG a 1 m.

Modelo SIG 5 m

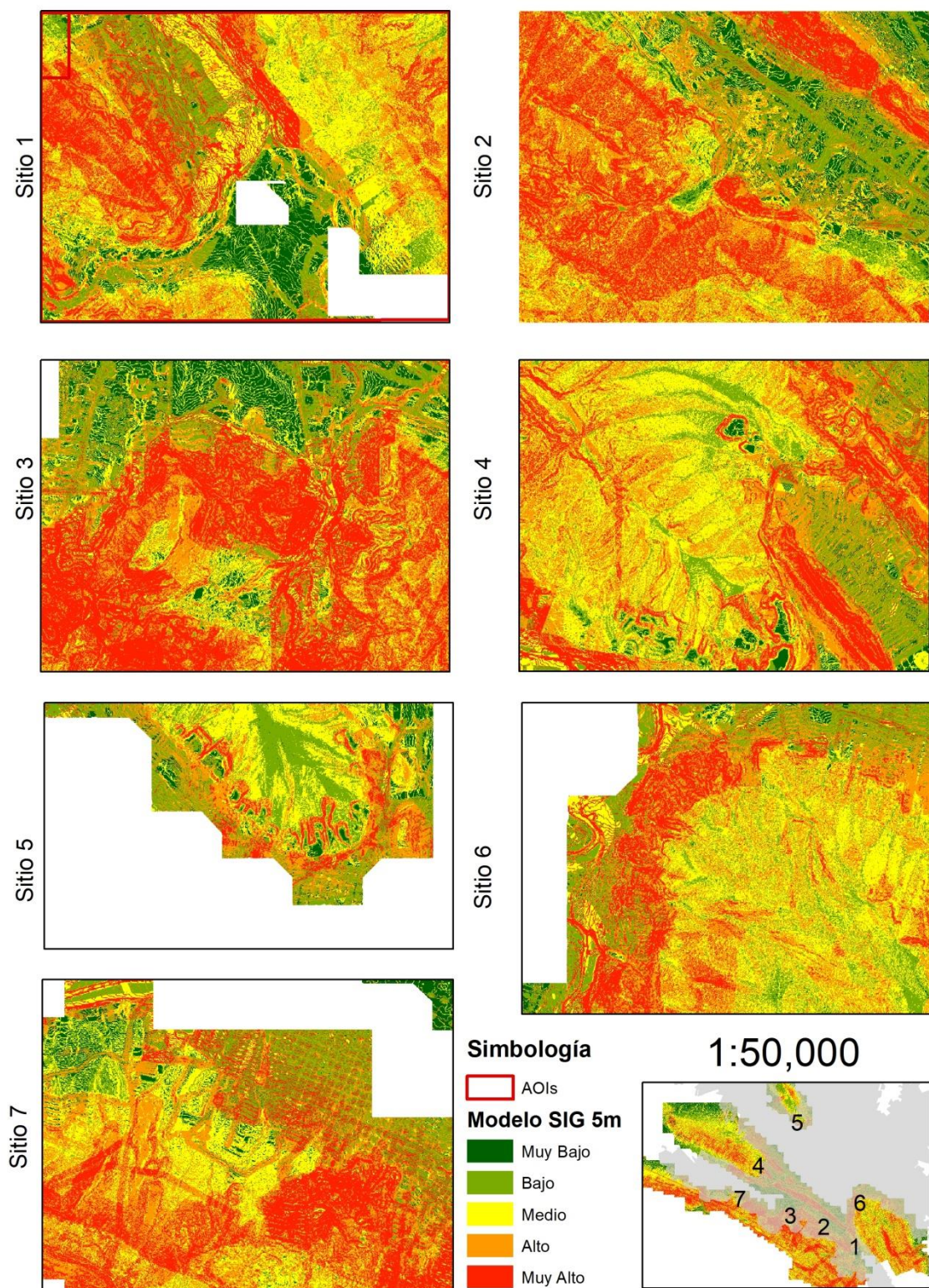


Figura 64. Resultado de modelación SIG a 5 m.

4. Resultados

4.2 Inventario de deslizamientos

El objetivo de este trabajo es comparar los resultados obtenidos a través de un inventario manual y un inventario automatizado dependiente del MDE. El inventario manual se realizó haciendo una comparación entre imágenes satelitales de diferentes fechas, cubriendo un intervalo de 2012 a 2017, con ayuda de una visualización de relieve 3D. El análisis comparativo manual, registra diferentes tipos de deslizamientos presentes en el área de estudio, como derrumbes o flujo de derrubios y deslizamiento de material cuya trayectoria de desplazamiento de material coincide con la línea de flujo de la escorrentía local.

Mapeo manual de deslizamientos

La mayor parte de los deslizamientos de material observados en el área de estudio se coinciden con las cárcavas previamente delimitadas por la escorrentía superficial. Un ejemplo de esto, es la comparativa de las Figura 65a y Figura 65b, las cuales corresponden a imágenes de los años 2008 y 2009 y que corresponden a una zona de derrumbe asociado a flujo de derrubios, sobre el cauce de la escorrentía de la montaña. En la Figura 65b se puede observar también, un deslizamiento preexistente del mismo tipo. En la Figura 65c se pueden observar ventanas de erosión sobre la ladera de la montaña, que están condicionadas por la escorrentía superficial. Por otra parte, en la Figura 65d se ubica también una zona de derrubios, con material aparentemente más grueso, dando la apariencia de un evento de tipo avalancha.

4. Resultados

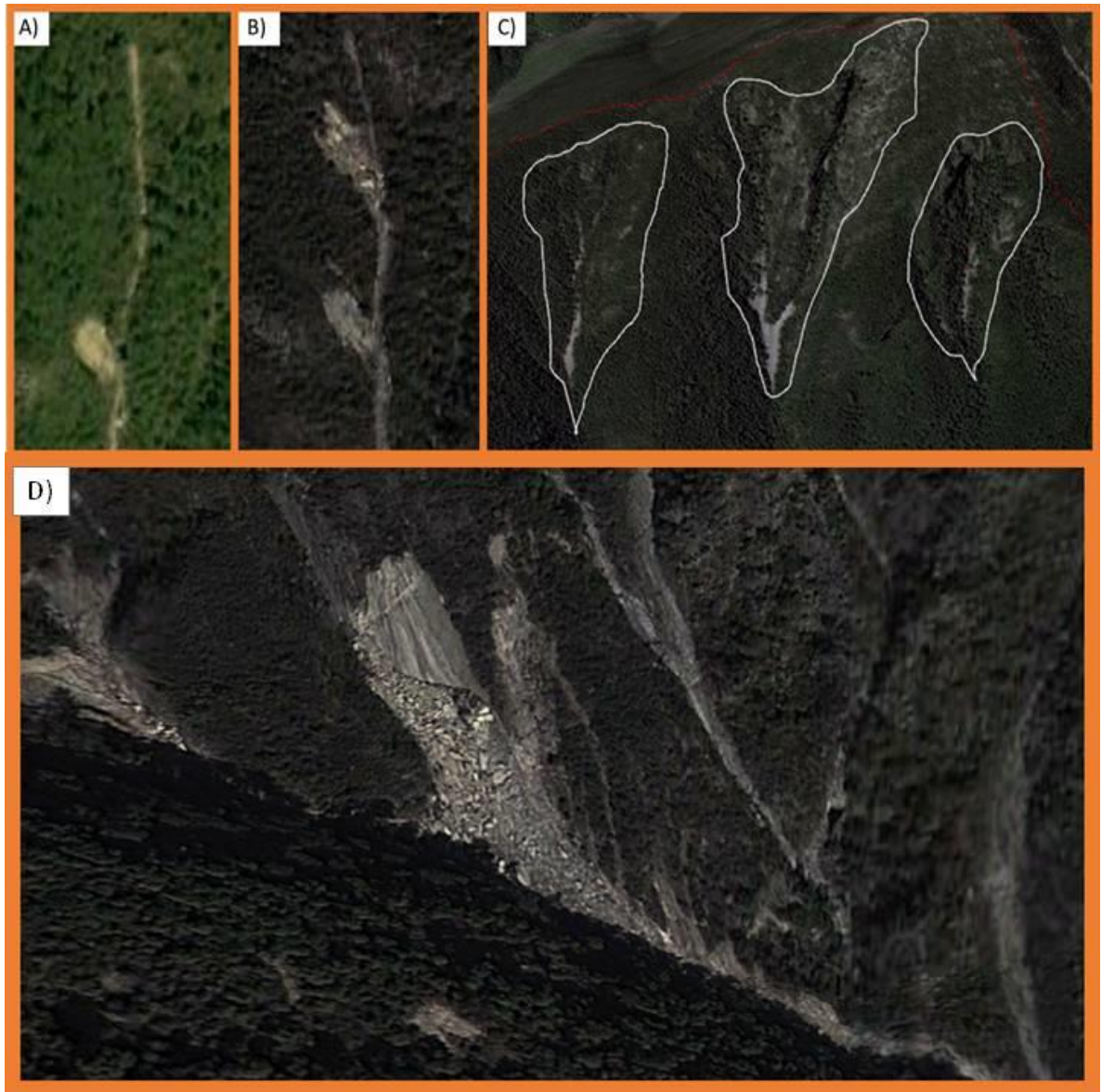


Figura 65. Ejemplos de deslizamientos dentro del área de estudio, incisos a y b corresponden a la misma zona pero a diferente fecha (2008 y 2009) en las cuales se aprecia la aparición de un montículo de derrubios; c) corresponde al mapeo realizado sobre una imagen de 2011, en donde se ubicaron las huellas de 3 eventos pre-existentes asociados a escorrentía de flujo y d) Se muestra material caído y depositado río abajo en la montaña, en una imagen de 2009, evento asociado con movimientos de tipo avalancha.

La validación, que es la corroboración del resultado proyectado obtenido por el modelo con respecto a los valores reales del área, se realizó con respecto a la caracterización manual de deslizamientos por la metodología tradicional, utilizando imágenes satelitales de alta resolución, los resultados de estos polígonos se presentan en la Figura 66. Se obtuvieron 15 polígonos, de deslizamientos aparentes, se registró un

4. Resultados

posible tipo de deslizamiento con base en la apariencia vista sobre la imagen. Se compararon las coberturas que cubría cada método, con respecto a los polígonos obtenidos manualmente Figura 66.

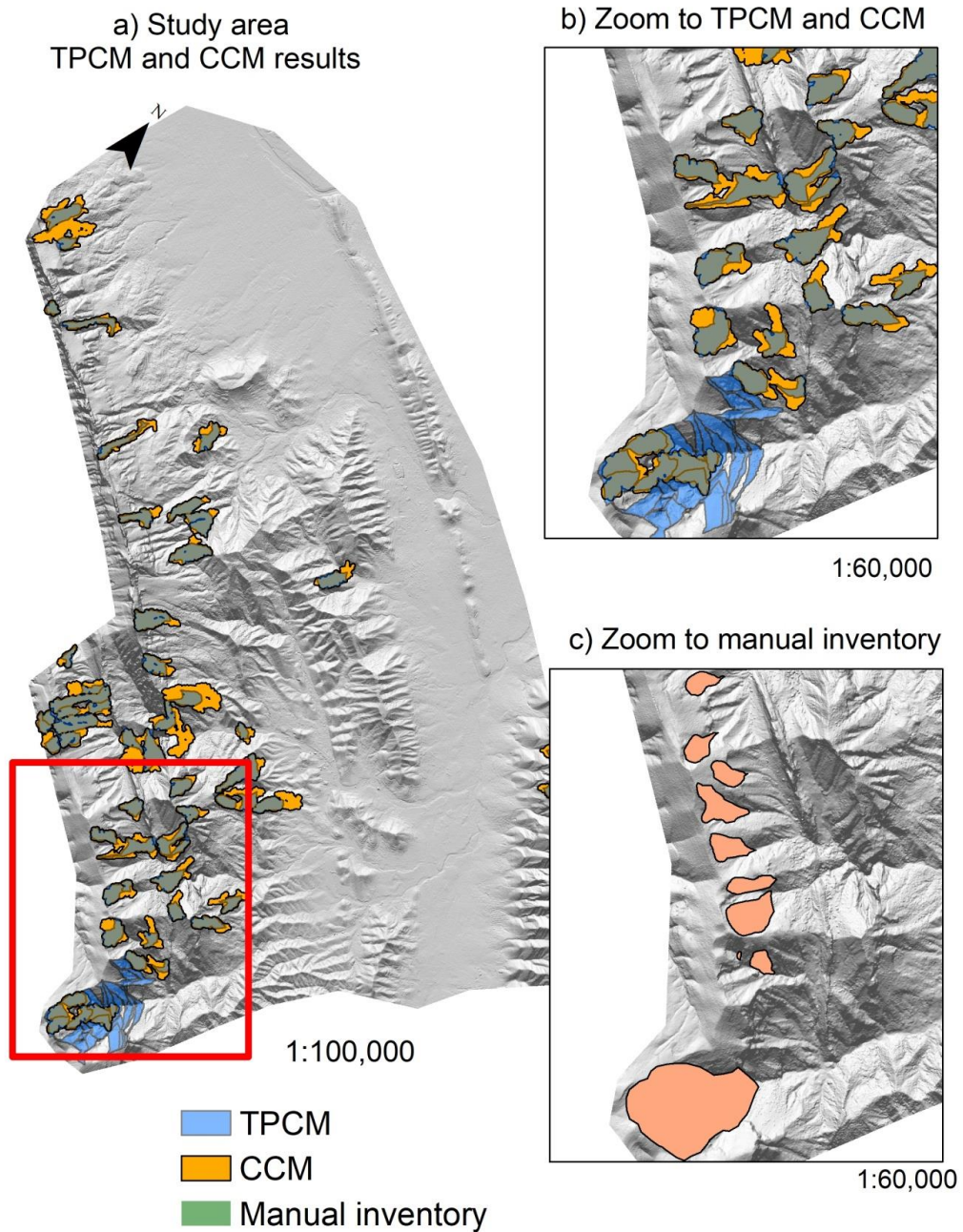


Figura 66. Resultados del mapeo de deslizamientos históricos mediante 3 métodos: TCM, CCM y la metodología tradicional (Ramírez Serrato, Yépez-Rincón, & Ferriño Fierro, 2019).

4. Resultados

Tabla 21 Caracterización manual, con extensión de cobertura (en m²), el año de la imagen en la que se visualizó el deslizamiento y la evidencia con la cual se reconoció el polígono.

Año de la imagen	Evidencia de eventos	Cobertura (km ²)
2005	Deslizamiento	0.003
2006	Escarpe	0.014
2011	Caídos	0.032
2011	Caídos	0.080
2013	Caídos	0.065
2013	Deslizamiento	0.010
2014	Caídos	0.127
2014	Caídos	0.004
2014	Deslizamiento	0.093
2014	Deslizamiento	0.103
2014	Deslizamiento	0.231
2014	Deslizamiento	0.177
2014	Flujo	0.095
2014	Flujo	0.087
2014	Caídos	1.420

Mapeo de inventario de deslizamientos automatizado

El método automatizado se basa en la detección de escarpes, por lo que la adecuación del método de Gaidzik, asigna una mayor definición del modelo. La detección de escarpes resultó ser muy similar mediante el método SI y el VRM, las variaciones en la elección de los valores de umbrales aun dependen mucho de la experiencia del autor. Sin embargo, a partir de los escarpes obtenidos por el VRM se obtuvieron deslizamientos más locales y de resoluciones bajas, mientras que los escarpes obtenidos por el SI delimitan mejor los deslizamientos condicionados a direcciones de flujo.

Los resultados obtenidos para el método de conexión topográfica (TCM) se obtuvo una cobertura total de 15.61 km², dentro de la región 1, mientras que para el método de conexión por contornos (CCM) se obtuvieron 9.45 km². Se obtuvo una mayor cantidad de polígonos por los métodos automatizados en comparación con la metodología manual, con la que se obtuvieron 1.29 km², como se observa en la Figura 67.

Aunque ambos modelos se rigen por metodologías distintas, ambos utilizan el relieve topográfico, como insumo principal. La pendiente es una condicionante hidrológica dentro del sistema, las líneas que conectan la pendiente coinciden con las zonas de flujo de corriente. La mayor diferencia entre los modelos TCM y CCM, es la

4. Resultados

cobertura del polígono. Debido al proceso en que se conecta, TCM, involucra el área de captación alrededor de las corrientes, mientras que el modelo CCM, se apega a la forma y contorno de las líneas de flujo, lo que se observa como polígonos más definidos con coberturas menores, como se puede observar en la Figura 67.

Tabla 22. Resultados estadísticos de coberturas para la Región 1 y la Región 2, para el método TCM, CCM y tradicional (manual).

	Región 1			Región 2	
	CCM	TCM	Manual	CCM	TCM
Conteo de sitios	32	56	15	9	19
Cobertura total (km ²)	9.452	15.611	2.544	2.717	4.524
Cobertura máxima (km ²)	1.474	0.547	1.420	0.8437	0.476
Cobertura mínima (km ²)	0.087	0.0633	0.003	0.020	0.026

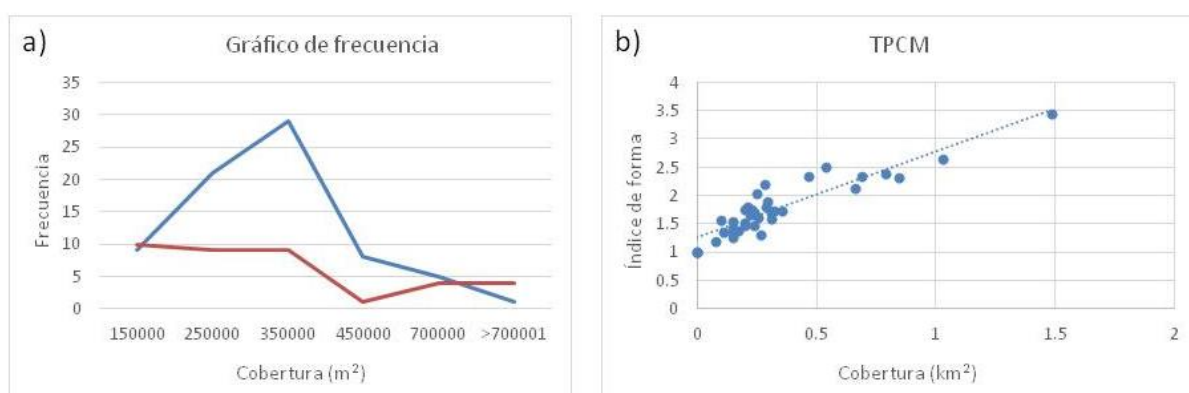


Figura 67. A) Histograma de frecuencia de las áreas de cobertura para los métodos TCM (Línea azul) y CCM (Línea roja) y B) los resultados de índice de forma del método TPCM.

En la Tabla 23 se muestra la cobertura total de los polígonos resultantes de ambos métodos. Se comparó la cobertura de los polígonos manuales, espacialmente, para buscar zonas de coincidencia entre los métodos. Los resultados indican un 52% de coincidencia para el método TCM con respecto al manual. El método CCM obtuvo un 38% de coincidencia. También se realizó una comparación de coberturas entre los métodos. El CCM coincide espacialmente un 80% con el TCM, con lo cual apenas cubre la mitad de las zonas reportadas por este último método. En la región 2 el CCM coincide en un 68% con lo reportado por el TCM. Las coincidencias reportadas coinciden con el método utilizado para delimitar los polígonos. Ambos métodos basan su algoritmo en variaciones y dirección de pendientes, lo que se relaciona mucho con dirección de flujo. Aunque los métodos coinciden espacialmente, los polígonos provenientes de CCM son más afines a la dirección del flujo.

4. Resultados

Tabla 23. Porcentaje de cobertura de traslape entre los métodos automatizados y el método manual, y la comparación entre ambos modelos para las dos regiones.

	total	Traslape			
		Manual (m2)	Manual (%)	Vs. Región 1 (%)	Vs. región 2 (%)
TCM	15611217.26	1346340.19	52.91	49.96	40.92
CCM	12200534.51	968678.7	38.07	82.51	68.14

El método TCM, basa su comportamiento en el área de captación de la corriente de flujo, por lo que el resultado final se expresa en polígonos más grande y de formas uniformes. En la Figura 67 se muestra la comparación de los resultados de Índice de forma. EL método TCM, Figura 67, se muestra como la forma del polígono se mantiene independientemente de su cobertura, mientras que CCM, más sinuosas conforme se convierte en polígonos de mayor tamaño, por lo que no muestra una correlación en su grafica de índice de forma. CCM basa su modelo directamente de las líneas de flujo, líneas de mayor longitud, tendrán más ramificaciones lo que producirán formas más sinuosas.

Considerando los resultados anteriores, se puede determinar que el método CCM se condiciona por la forma del canal de flujo que le corresponde a cada escarpe, por lo que el área de deslizamiento reportada tiende a ser menor que para el método TCM. Por otro lado, el método TCM, tiende a considerar el área de posible afectación, registrando una mayor cobertura de aporte, lo que podría asemejarse más en términos reales de entorno, ya que las partículas menores pueden tender a salirse del canal de flujo, durante el movimiento por cuestiones de empuje y fluidez. Los polígonos obtenidos a partir del método TCM son más uniformes entre sí, y consideran un área de influencia mayor. Ambos métodos son útiles para detectar el área de influencia después del deslizamiento.

Por otra parte, el método manual sesga los resultados a la comparativa visual. Aunque, sí se reconocieron zonas en donde se detectaron deslizamientos ya ocurridos, los polígonos se cierran en la zona de acumulamiento de material más próximo al escarpe, y no se consideran las partículas que trascienden pendiente abajo por falta de visualización, lo que provoca que la cobertura del polígono manual sea significativamente menor en comparación con los métodos automatizados. Sin embargo, las coberturas de los polígonos van a variar dependiendo el tipo de deslizamiento que se está visualizando, siendo más grandes los polígonos de tipo flujo que una caída de rocas, algo que no se toma en cuenta por parte de los métodos automáticos.

4. Resultados

Validación de modelos con el inventario de deslizamientos

Se calculó el porcentaje de coincidencia entre las diferentes categorías del modelo, como se muestra en la Tabla 24, con respecto a los sitios en los que probablemente han ocurrido deslizamientos en masa, los cuales fueron detectados por los métodos automatizados TCM y CCM. De los resultados se puede determinar que del 86 al 95% de la cobertura mapeada por deslizamientos históricos coincide con las categorías de mediana a alta probabilidad, teniendo como menor porcentaje de coincidencia el modelo de 1m, debido a la mejora en resolución, aumenta la diferencia de pendiente de un pixel a otro, resultando en una generalización por resolución en el modelo de 5m.

Tabla 24. Porcentaje de traslape del modelo SIG con respecto a los sitios de probable ocurrencia de deslizamientos en masa.

ID	nivel	1m (m2)	%	5m (m2)	%
1	Muy Bajo	90,145.00	7.9	1,025.00	0.1
2	Bajo	69,013.00	6.1	57,545.00	4.7
3	Medio	438,471.00	38.4	296,650.00	24.5
4	Alto	247,360.00	21.7	449,170.00	37.0
5	Muy Alto	295,629.00	25.9	408,185.00	33.7
	Suma	1,140,618.00	Suma	1,212,575.00	

4. Resultados

4.3 Trabajo de campo

Para obtener estos valores se registraron 38 puntos de control, repartidos entre los 11 sitios. Con los resultados obtenidos se muestra que los valores de error promedio obtenidos de la comparación del modelo grueso al mediano es de 1.53 m, mientras que el resultado obtenido de la comparación del modelo local al modelo de mediana resolución bajó a 0.09 registrándose una mejora del 93.97%. Por otro lado, los valores de errores máximos registrados son de 12.36 m con respecto a los 1.84 m del modelo local (mejora de 85.09%). Aunque se debe aclarar que el atlas nacional de riesgos de escala gruesa, utiliza información de hasta 30 m de resolución, lo que amplía aún más el espectro del error de comparación. La metodología implementada correlaciona los datos obtenidos con MDE de 1 m, por lo que el error registrado por sitio tiene un promedio general de 0.07, menor al 1.58 registrado en el comparativo entre los MDE de 1m y 5m, aunque la diferencia de los datos sigue siendo notable en este ultimo comparativo, como se puede observar en la Figura 68. Del total de puntos de control, 2 registraron valores de error de hasta 12 m con respecto al modelo de 5 m, como se puede observar en la Figura 69 A, mientras que en los modelos locales los valores de diferencia máxima no pasan de los 2 m con respecto al MDE de 1m (Figura 69 B). El error más alto registrado es para el sitio ubicado en la Silla/las Águilas, un lugar de intensa vegetación que fue recientemente modificado, por lo que puede deberse a un error en el filtrado de la información generando un diferencial alto entre los MDE de 1m y 5m (Figura 69 C).

De acuerdo a los modelos obtenidos y tomando en cuenta los datos de error, se obtuvo un porcentaje de cambio de cobertura, como se muestra en la Figura 70, de los modelos locales (VANT) con respecto al modelo medio (1 m), los resultados indican que existe un porcentaje de cambio en el terreno del 40 %, mientras que un 58 % de la cobertura se encuentra dentro del rango de error permitido (± 2 m), es decir, no presenta cambios, por otro lado, la cobertura que presenta errores máximos es del 0.67 % con respecto al total del área muestreada, registrándose en zonas montañosas de vegetación intensa con presencia de dosel arbóreo, o matorral, los cuales no permiten la buena reconstrucción de la altura del suelo.

4. Resultados

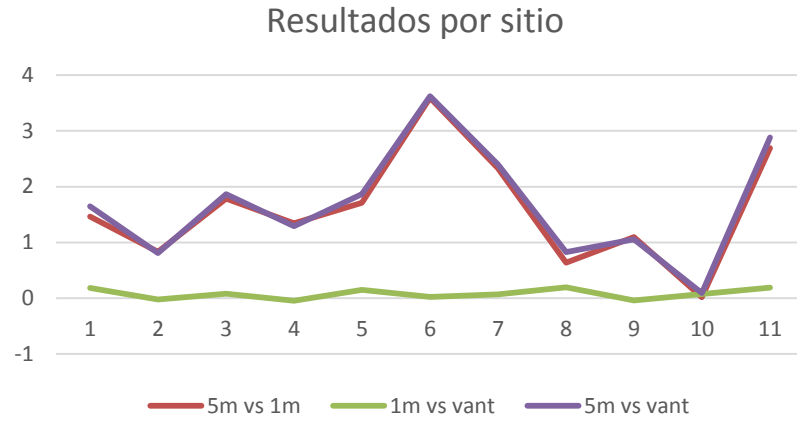


Figura 68. Reporte de error (m) registrado por sitio entre las diferentes escalas.

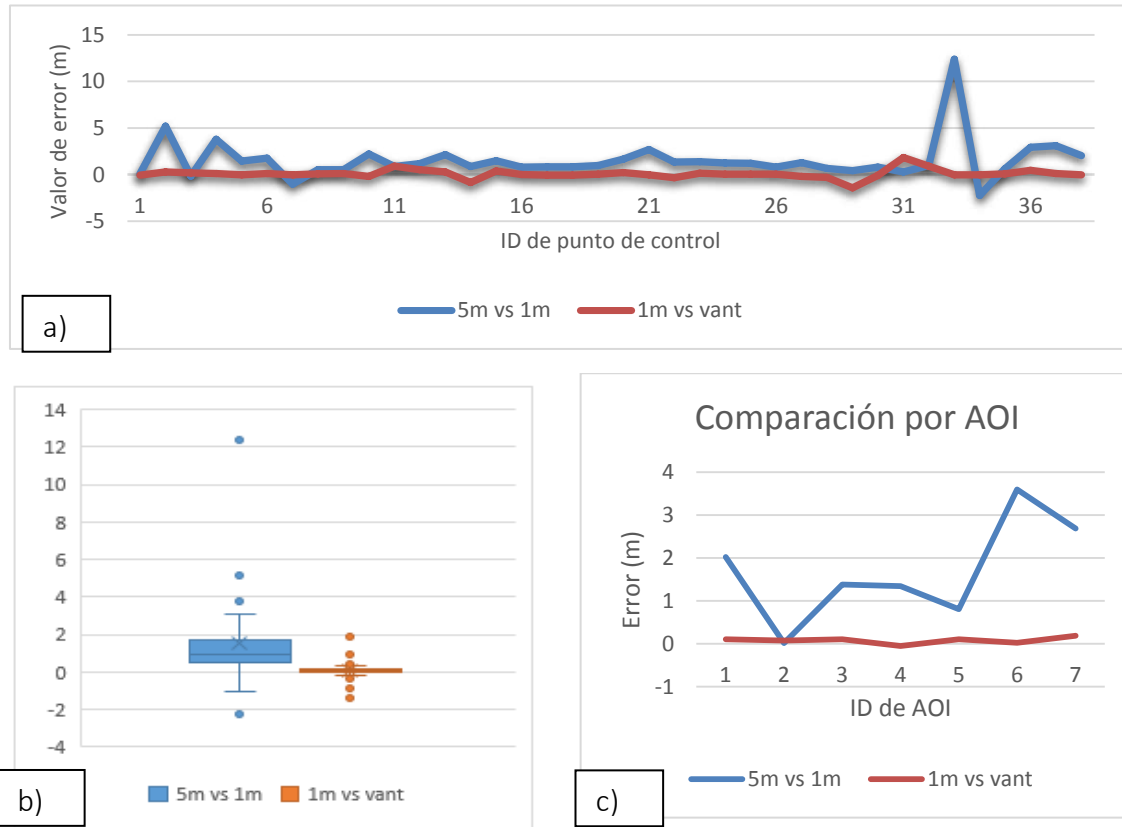


Figura 69 Gráficos de comparación de resultados, entre la metodología tradicional de escala 5m con respecto a una escala de mediana resolución (1 m) y el error generado a una escala local (VANT, 0.1 m).

4. Resultados

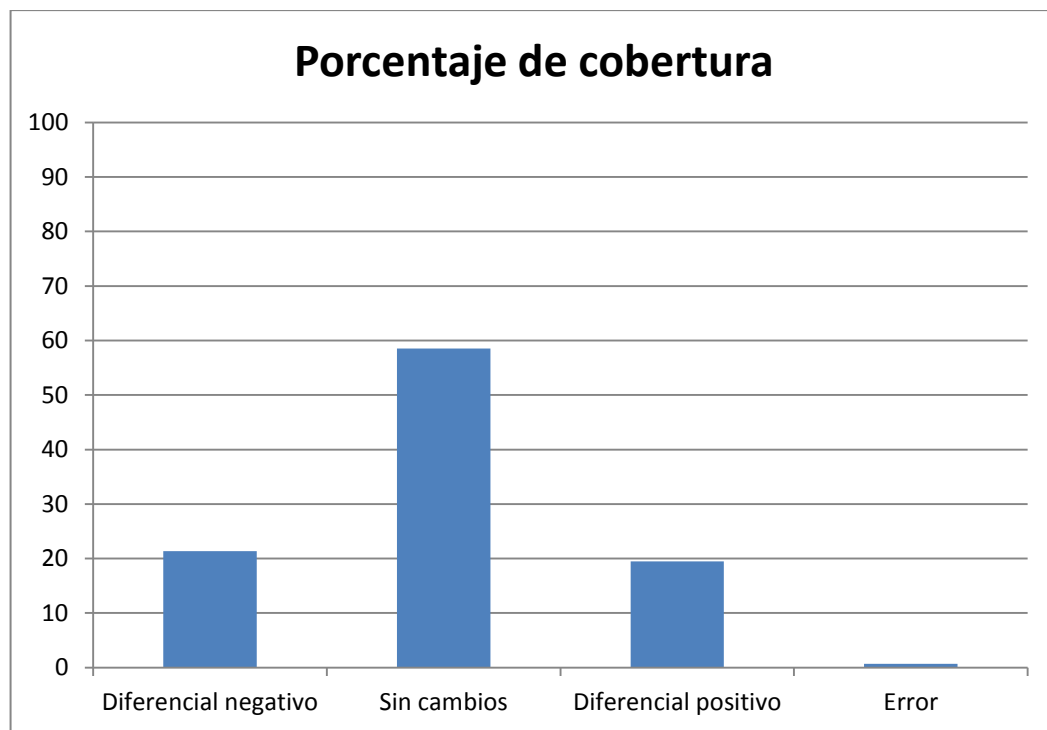


Figura 70. Porcentajes de cambio de cobertura de los sitios levantados con respecto al MDE de 1m.

5 CONCLUSIONES

5.1 Modelo SIG

Para este proyecto se evaluó la relación que existe entre la precisión resultante del modelo SIG a diferentes escalas con respecto a los insumos utilizados para su elaboración. Tomando como base el MDE insumo en ambos modelos, a 5 m para la escala gruesa y 1m para escala mediana. De los resultados se resume que en el 30% del territorio muestreado se obtuvieron los mismos resultados para ambos modelos, de los cuales el 40 % corresponde a la categoría de “muy alta susceptibilidad”. El modelo de 1m demostró mayor definición en el resultado, reclasificando las zonas de muy alta resolución entre alto y muy alto. Por otro lado, la falta de definición en los datos, permite que el modelo de 5m aun presente zonas montañosas catalogadas de “muy baja” susceptibilidad. Rectificando la necesidad de este tipo de estudios, los resultados indican que el 70% del territorio (322.7km²) se encuentran catalogados entre susceptibilidad “media” a “muy alta” de los cuales alrededor del 20% corresponde a la categoría de “Muy alto”. Por lo que es necesario continuar desarrollando estudios posteriores que permitan cruzar la información aquí obtenida con datos de urbanización para planeación territorial.

5.2 Inventario de deslizamientos

El uso de las nuevas tecnologías ha revolucionado el trabajo de campo en temas ambientales, permitiendo acelerar el trabajo de una manera más eficiente. El uso de imágenes aéreas para realizar caracterizaciones de sitio ya ha sido ampliamente usado y probado durante mucho tiempo, la automatización de estos métodos permite acelerar el proceso, obteniendo una vista generalizada de coberturas más amplias.

El propuesto índice de TCM basa su modelo en el reconocimiento de escarpes y áreas de captación. TCM cubre una extensión territorial más amplia, tomando en cuenta zonas que el modelo CCM puede ignorar, debido a que este último considera zonas de flujo pequeñas para escarpes de cobertura menor, mientras que el otro método, considera el área de captación de la corriente principal a la que correspondería dicho escarpe, independientemente de su porcentaje de cobertura.

5. Conclusiones

5.3 Trabajo de campo

La integración de la información de ultra alta resolución proveniente de los drones, LIDAR terrestre y metodología tradicional como ejercicio para reconocimiento de facetas en las laderas, permitió la delimitación del uso únicamente de drones para el trabajo de campo, por el mejor balance entre rendimiento, resolución y practicidad. Siendo los drones, una herramienta de gran utilidad para la generación de información actualizada y precisa.

La metodología propuesta permite la integración de nueva información dentro de los modelos regionales, lo que permitirá una mejor evaluación futura sobre estudios específicos de caso, disminuyendo el error métrico de precisión de 1.56 a 0.09 m, registrándose una mejora del 93.97% en precisión vertical. Además, para este proyecto se determinó que el 40 % del área muestreada sufrió cambios en el terreno, ya sea por extracción de material o por acumulaciones de material antropogénico, el alto porcentaje de cambio en las zonas de estudio, demuestra la necesidad del monitoreo de zonas en riesgo.

6 BIBLIOGRAFÍA

Alcántara Ayala, I., & Murillo García, F. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacía una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones geográficas* , 66, 47-64.

Alcántara Ayala, I., Echavarría Luna, A., Gutiérrez Martínez, C., Domínguez Morales, L., & Noriega Rioja, I. (2001). Inestabilidad de laderas. *Serie Fascículos* , 6.

Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment* , 58 (1), 21-44.

Allmendinger, R. W., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors* (Primera ed.). Cambridge University Press.

Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., & Ahmad, N. (2015). Estimation of rainfall threshold and its use in landslide hazard mapping of Kuala Lumpur metropolitan and surrounding areas. *Landslides* , 12 (5), 861-875.

Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zo-nation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology* , 32 (4), 269-277.

Bai, S., Lü, G., Wang, J., Zhou, P., & Ding, L. (2011). GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. *Environmental Earth Sciences* , 62 (1), 139-149.

Bardossy, A., & Schmidt, F. (2002). GIS approach to scale issues of perimeter-based shape indices for drainage basins. *Hydrological sciences journal* , 47 (6), 931-942.

Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Núñez Roman, O. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* , 47 (2), 141-162.

Benhamu, M., & Doytsher, Y. (2003). Toward a Spatial 3D Cadastral in Israel. *Computers, Environment and Urban Systems* , 27, 359-374.

Berry, S. L., & Mackey, B. (2018). On modelling the relationship between vegetation greenness and water balance and land use change. *Scientific reports* , 8 (1), 9066.

Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer.

Bitelli, G., Dubbini, M., & Zanutta, A. (2004). Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of Commission V, XXth ISPRS Congress* , 246-251.

Blauser, W. (1981). The stratigraphy of the Taraises Formation, Lower cretaceous, Mexico, en C.I.Smith, ed., Lower Cretaceous stratigraphy and structure, northern Mexico. *West Texas Geologic* , 81, 37-42.

Bolstad, P. V., & Lillesand, T. D. (1991). Rapid Maximum Likelihood classification. . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* , 57, 67-74.

Borghuis, A. M., Chang, K., & Lee, H. Y. (2007). Comparison between automated and manual mapping of typhoon-triggered landslides from SPOT-5 imagery. *International Journal of Remote Sensing* , 28 (8), 1843-1856.

Borrás, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. *Revista de Teledetección* , 48, 55-66.

Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. B. (2013). Regional prediction of landslide hazard using probability analysis of intense rainfall in the Hoa Binh province, Vietnam. *Natural hazards* , 66 (2), 707-730.

Burrough, P. A., & McDonell, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems. *Oxford University Press* , 190.

Camper, M. A. (1977). Estratigrafía y Microfacies Cretácicas del Anticlinorio Huizachal-Peregrina (Sierra Madre Oriental). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* , 38 (2), 1-17.

Cantú Silva, I. (2012). *Buscan prevenir desastres en las laderas de la Sierra Madre Oriental*. Recuperado el 12 de Marzo de 2015, de UANL, noticias: <http://www.uanl.mx/noticias/investigacion/buscan-prevenir-desastres-en-las-laderas-de-la-sierra-madre-oriental.html>

Carlson, T. N., & Arthur, S. T. (2000). The impact of land use—land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and planetary change* , 25 (1-2), 49-65.

Cartwright, S. (2005). *National Civil Defence Emergency Management Plan Order 2005*. Wellington, New Zealand: Published under the authority of the New Zealand Government.

Cázares-Rodríguez, J. E., Vivoni, E. R., & Mascaro, G. (2017). Comparison of Two Watershed Models for Addressing Stakeholder Flood Mitigation Strategies: Case Study of Hurricane Alex in Monterrey, México. *Journal of Hydrologic Engineering* , 22 (9), 05017018.

Cervantes Zamora, Y., CornejoOlgín, S. L., Lucero Márquez, R., Espinoza Rodríguez, J. M., E., M. V., & Pineda Velázquez, A. (1990). Provincias Fisiográficas de México. Extraído de Clasificación de regiones naturales de México II, IV.10.2. *Atlas nacional de México* .

Chapa Guerrero, J., Chapa Arce, R., Méndez Delgado, S., & Lemus Alarcón, O. R. (2010). Los huracanes (riesgos naturales) como factor desencadenantes de los riesgos geológicos del AMM, Nuevo León, México. . *Geos* , 30 (1), 136.

Chávez Cabello, G. (2016). La Sierra Madre Oriental de México, un cinturón orogénico de pliegues y cabalgaduras de la Cordillera de Norteamérica. *Ciencia UANL* , 82, 6714.

Chávez Cabello, G., Torres Ramos, J. A., Vázquez, P., Damián, N., Cossio Torres, T., & Aranda Gómez, J. J. (2011). Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* , 63 (2), 253-270.

Chen, H., & Lee, C. F. (2003). A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. *Geomorphology* , 51 (4), 269-288.

Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., & Yin, Z. Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote sensing of environment* , 104 (2), 133-146.

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* , 92, 79-97.

CONAPO. (2010). *Consejo Nacional de Población*. Recuperado el 06 de Mayo de 2019, de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas_metropolitanas_2010/mapas/ZM31.pdf

CONAPO, I. S. (2010). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. . Obtenido de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Delimitacion_zonas_metropolitanas_2010_Capitulos_I_a_IV

Corominas, J. V., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., & Pitilakis, K. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of engineering geology and the environment* , 73 (2), 209-263.

Corpstein, P. (1974). *The la Joya and La Boca formations, in Conlkin et al. (eds.) Geology of Huizachal-Peregrina Anticlinorium*. Pan American Geological Society Field trip.

Coulon, A., Morellet, N., Goulard, M., Cargnelutti, B., Angibault, J. M., & Hewison, A. M. (2008). Inferring the effects of landscape structure on roe deer (*Capreolus capreolus*) movements using a step selection function. *Landscape Ecology* , 23 (5), 603-614.

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* , 43 (1), 27-29.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. *Transportation research board special report* , 247.

Dąbski, M., Zmarz, A., Pabjanek, P., Korczak Abshire, M., Karsznia, I., & Chwedorzewska, K. J. (2017). UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology* , 290, 29-38.

Dai, F., & Lee, C. F. (2002). Landslides on natural terrain. *Mountain Research and Development* , 22 (1), 40-48.

De Tamaulipas, G. D. (2009). *Atlas de riesgos de los municipios de Tampico, Madero y Altamira del Estado de Tamaulipas*. Ciudad Victoria, Tamps.: Gobierno del Estado de Tamaulipas.

DeFries, R. S., & Townshend, J. R. (1994). NDVI-derived land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing* , 15 (17), 3567-3586.

Desarrollo Urbano, S. (2017). *Estrategia de desarrollo urbano del estado, Instalación del Consejo Estatal de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano*. Nuevo León, México: Secretaría de Desarrollo Sustentable.

Dewan, A. M., & Yamaguchi, Y. (2009). Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960–2005. *Environmental monitoring and assessment* , 150 (1-4), 237.

Dewez, T. J., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., & Rohmer, J. (2016). Facets: a cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* , 41.

Dji. (2019). <https://www.dji.com/mx/phantom-3-pro/info>. Recuperado el 2019, de <https://www.dji.com/mx/phantom-3-pro/info>

DOF. (28 de Enero de 1988). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 6 de Mayo de 2019, de DOF28/01/1988. : <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf>

DOF. (3 de Marzo de 1999). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 06 de Mayo de 2019, de DOF/03/03/1999: <http://www.transparenciasanicolas.mx/articulo10/Pdf/FraccionI/leyes/LeyOrdenamientoTerritorial.pdf>

DOF. (09 de Mayo de 2016). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 06 de Mayo de 2019, de DOF09/05/2019: http://www.dof.gob.mx/avisos/2493/SG_090516/SG_090516.html

DOF. (22 de 03 de 2013). *Periódico Oficial*. Recuperado el 06 de 05 de 2019, de Gobierno Consistucional del estado libre y soberano de Nuevo León: http://200.23.43.29/atlas/Atlas_Riesgo_prim_et_publicacion_22_mar_2013.pdf

Donezar-Hoyos, U., Larrañaga Urien, A., Tamés-Noriega, A., Sánchez-Gil, C., Albizua-Huarte, L., Ciriza-Labiano, R., y otros. (2017). Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. *Revista de Teledetección* , 49-57.

Doser, D. I., & Rodriguez, J. (1933). The seismicity of Chihuahua, Mexico, and the 1928 Parral earthquake. *Physics of the Earth and Planetary interiors* , 78 (1-2), 97-104.

Doyle, M., Harbor, J., Rich, C., & Spacie, A. (2000). Examining the effects of urbanization on streams using indicators of geomorphic stability. *Physical Geography* , 21 (2), 155-181.

Dubayah, R., & Drake, J. (2000). LIDAR remote sensing for forestry. *Journal of Forestry* , 98, 44-46.

Echánove, E. (1986). Geología petrolera de la Cuenca de Burgos. Parte I. Consideraciones Geológico-petroleras. *Boletín de la Asociación* , 18 (1), 3-39.

Eguiluz de Antuñano, S., Aranda García, M., & Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* , 53 (1), 1-26.

Enos, P. (1974). Reefs, platforms, and basins of middle Cretaceous in northeast Mexico. *AAPG Bulletin* , 58 (5), 800-809.

Erbek, F. S., Özkan, C., & Taberner, M. (2004). Comparison of maximum likelihood classification method with supervised artificial neural network algorithms for land use activities. *International Journal of Remote Sensing* , 25 (9), 1733-1748.

Erbek, F. S., Özkan, C., & Taberner, M. (2004). Comparison of maximum likelihood classification method with supervised artificial neural network algorithms for land use activities. *International Journal of Remote Sensing* , 25 (9), 1733-1748.

Erdas, I. (1999). *Erdas Field Guide*. Atlanta, Georgia: Erdas Inc.

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., y otros. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* , 45.

Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., y otros. (2009). Carved visual hulls for image-based modeling. *International Journal of Computer Vision* , 81 (1), 53-67.

Fell, R., Lacerda, W., Cruden, D. M., Evans, S. G., LaRochelle, P., Martinez, F., y otros. (1990). A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* , 5-12.

Fisher, G. B., Amos, C. B., Bookhagen, B., Burbank, D. W., & Godard, V. (2012). Channel widths, landslides, faults, and beyond: The new world order of high-spatial resolution Google Earth imagery in the study of earth surface processes. *Geological Society of America Special Papers* , 492, 1-22.

Fisher, J. R., Acosta, E. A., Dennedy-Frank, P. J., Kroeger, T., & Boucher, T. M. (2018). Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* , 4 (2), 137-149.

Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote sensing of environment* , 80 (1), 185-201.

Foody, G. M., Campbell, N. A., Trodd, N. M., & Wood, T. F. (1992). Derivation and applications of probabilistic measures of class membership from the maximum-likelihood classification. *Photogrammetric engineering and remote sensing* , 58 (9), 1335-1341.

Forkuor, G., Dimobe, K., Serme, I., & Tondoh, J. E. (2018). Landsat-8 vs. Sentinel-2: examining the added value of sentinel-2's red-edge bands to land-use and land-cover mapping in Burkina Faso. *GIScience & Remote Sensing* , 55 (3), 331-354.

Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence* , 32 (8), 1362-1376.

Gaidzik, K., Ramírez Herrera, M. T., Bunn, M., Leshchinsky, B. A., Olsen, M., & Regmi, N. R. (2017). Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico. . *Natural Hazards and Risk, Geomatics* , 1-26.

Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* , 94 (3), 268-289.

Gaprindashvili, G., & Van Westen, C. J. (2016). Generation of a national landslide hazard and risk map for the country of Georgia. *Natural Hazards* , 80 (1), 69-101.

Gary, M., McAfee, R., & Wolf, C. L. (1972). Glossary of Geology. *American Geological Institute* .

Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena* , 51 (3-4), 297-314.

Goetz, J. N., Guthrie, R., & Brenning, A. (2011). Integra-ting physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology* , 129, 376-386.

Goldhammer, R. K., & Lehmann, R. J. (1991). Sequence stratigraphic summary. Sequence stratigraphy and cyclostratigraphy of the Mesozoic of the Sierra Madre Oriental, northern Mexico. *Gulf Coast Section SEPM Foundation* , 7-9.

Gomez, C., & Purdie, H. (2016). UAV-based photogrammetry and geocomputing for hazards and disaster risk monitoring—a review. *Geoenvironmental Disasters* , 3 (1), 23.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.

González, G. (1976). Bosquejo geológico de la zona noreste (resumen). *Memoria del III Simposium de Geología de Subsuelo, Zona Noreste, Reynosa, Tamaulipas* (págs. 5-30). Reynosa, Tamaulipas: Petróleos.

Gravelius, I. (1914). Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. *Compendium of Hydrology* , 1.

Gupta, R. P., Saha, A. K., Arora, M. K., & Kumar, A. (1999). Landslide hazard zonation in a part of the Bhagirathi valley, Garhwal Himalayas, using integrated remote sensing-GIS. *Himalayan Geology* , 20 (2), 71-85.

Gutierrez, M., Santoyo, G. G., Quaas, W., Ordaz, S., Guevara, O., Muriá, V., y otros. (1990). *Serie Fascículos: Sismos*. México, D.F.: CENAPRED.

Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* , 112 (1-2), 42-66.

Haas, J., & Ban, Y. (2018). Urban Land Cover and Ecosystem Service Changes based on Sentinel-2A MSI and Landsat TM Data. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* , 11 (2), 485-497.

Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. Reston: US Geological Survey.

Hobson, R. (1972). Surface roughness in topography: quantitative approach. En R. J. Chorley (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology* (págs. 221-245). London: Methuen.

Huang, R., Pei, X., Fan, X., Zhang, W., Li, S., & Li, B. (2012). The characteristics and failure mechanism of the largest landslide triggered by the Wenchuan earthquake, May 12, 2008, China. *Landslides* , 9, 131–142.

IMPLAN. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del municipio de San Pedro Garza García*. San Pedro Garza García-UANL. San Pedro Garza García: Gobierno Municipal.

INEGI. (2014). *Guía para la interpretación de cartografía, uso del suelo y vegetación, Escala 1: 250 000, Serie V*. Aguascalientes: INEGI.

INEGI. (2017). *Inegi presenta carta de Uso de Suelo y Vegetación SERIE VI*. Aguascalientes: INEGI.

Jebur, M. N., Pradhan, B., & Tehrany, M. S. (2014). Optimization of landslide conditioning factors using very high-resolution airborne laser scanning (LiDAR) data at catchment scale. *Remote Sensing of Environment* , 152, 150-165.

Jenness, J. (2006). *Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a*. Jenness Enterprises. Flagstaff: Jenness Enterprises.

Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* , 54 (11), 1593–1600.

Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., & Glassey, P. J. (2009). A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography* , 33 (2), 183-207.

Karasiak, N. (2017). *Dzetsaka: Classification tool*. Recuperado el 2019, de <https://plugins.qgis.org/plugins/dzetsaka/>

Karasiak, N., & Perbet, P. (2018). Remote Sensing of Distinctive Vegetation in Guiana Amazonian Park. *QGIS and Applications in Agriculture and Forest* , 2, 215-245.

Kavzoglu, T., Sahin, E. K., & Colkesen, I. (2014). Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* , 11 (3), 425-439.

Knapen, A., Kitutu, M. G., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., & Muwanga, A. (2006). Landslides in a densely populated county at the foot slopes of Mount Elgon (Uganda): characteristics and causal factors. *Geomorphology* , 73, 149–165.

Kumar, R., & Anbalagan, R. (2013). based terrain analysis for landslide hazard zonation, a case study of Tehri reservoir region, Uttarakhand, India. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (págs. 2868-2871). Australia: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Lang, S., & Blaschke, T. (2007). *Landschaftsanalyse mit GIS*. Stuttgart: Ulmer.

Lario, G. J., & Bardají, A. T. (2017). *Introducción a los riesgos geológicos*. Editorial UNED.

Larsson, G. (1991). *Land Registration and Cadastral Systems: Tools for Land Information*. New York: Longman.

Lehmann, C. T. (1997). *Sequence stratigraphy and platform evolution of Lower Cretaceous Barremian-Albian carbonates of northeast Mexico*. California: University of California at Riverside, Ph.D. dissertation.

Lehmann, C., Osleger, D. A., & Montañez, I. (1998). Controls on cyclostratigraphy of lower Cretaceous carbonates and evaporites, Cupido and Coahuila platforms, northeastern Mexico. *Journal of Sedimentary Research* , 68, 1109-1130.

Lehmann, C., Osleger, D. A., Montañez, I. P., Sliter, W., Vanneau, A. A., & Banner, J. (1999). Evolution of Cupido and Coahuila carbonate platforms, early Cretaceous, northeastern Mexico. *Geological Society of America Bulletin* , 111 (7), 1010-1029.

Lehmann, C., Osleger, D., & Montañez, I. (2000). Sequence stratigraphy of lower Cretaceous (Barremian-Albian) carbonate platforms of northeastern Mexico: Regional and global correlations. *Journal Sedimentary Research* , 70, 373-391.

Lepore, C., Kamal, S. A., Shanahan, P., & Bras, R. L. (2011). Rainfall-induced landslide susceptibility zonation of Puerto Rico. *Environmental Earth Sciences* , 1-15.

Leshchinsky, B. A., Olsen, M. J., & Tanyu, B. F. (2015). Contour Connection Method for automated identification and classification of landslide deposits. *Computers & geosciences* , 74, 27-38.

Li, C., Wang, J., Wang, L., Hu, L., & Gong, P. (2014). Comparison of classification algorithms and training sample sizes in urban land classification with Landsat thematic mapper imagery. *Remote Sensing* , 6 (2), 964-983.

Li, Z., Shi, W., Lu, P., Yan, L., Wang, Q., & Miao, Z. (2016). Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field. *Remote sensing of environment* , 187, 76-90.

Li, Z., Shi, W., Myint, S. W., Lu, P., & Wang, Q. (2016). Semi-automated landslide inventory mapping from bitemporal aerial photographs using change detection and level set method. *Remote sensing of environment* , 175, 215-230.

Lisle, R. J., & Leyshon, P. R. (2004). *Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers*. Cambridge University Press.

Liu, X., Zhang, Z., & McDougall, K. (2011). Characteristic analysis of a flash flood-affected creek catchment using LIDAR-derived DEM. *Proceedings of the 19th*

International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2011) (págs. 2409-2415). Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.

López-Caloca, A. A., Tapia-Silva, F. O., & Rivera, G. (2018). Sentinel-1 Satellite Data as a Tool for Monitoring Inundation Areas near Urban Areas in the Mexican Tropical Wet. En *Water Challenges of an Urbanizing World* (págs. 127-142). London: InTech.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. . *International Journal of Computer Vision* , 60 (2), 91–110.

Lozano, G. D. (2011). *Informe del proyecto del Río Santa Catarina*. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, ITESM.

Lozano, G. D. (2011). *Proyecto, Río Santa Catarina*. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, ITESM.

Lucas, I. F., Janssen, F., & van der Wel, F. J. (1994). Accuracy assessment of satellite derived landcover data: A review. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* , 60 (4), 479-426.

Lucieer, A., Jong, S. M., & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* , 38 (1).

Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* , 29 (6), 687-711.

Mantovani, F., Soeters, R., & Van Westen, C. (1996). Remote Sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* , 15, 213-225.

Martha, T. R., Kerle, N., Jetten, V. G., & Kumar, K. V. (2012). Object-oriented analysis of multi-temporal panchromatic images for creation of historical landslide inventories. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* , 67, 105-119.

Michalzik, D. (1988). *Trias bis tiefste Unter-Kreide der Nordostlichen Sierra Madre Oriental, Mexiko-Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinental randes*. Darmstadt, Alemania: Tesis Doctoral, Technischen Hochschule Darmstadt.

Micklethwaite, S., Turner, D., Vasuki, Y., Kovesi, P., Holden, E. J., & Lucieer, A. (2012). Mapping from an Armchair: Rapid, high-resolution mapping using UAV and computer vision technology. *Proceedings of Structural Geology and Resources* , 130-133.

Montalvo Arrieta, J. C. (2009). El potencial de riesgo sísmico en el noreste de México y sus implicaciones en la zona metropolitana de Monterrey, NL. *Ciencia UANL* , 12 (4).

Montalvo Arrieta, J. C., Gómez, L., & Valdés González, C. (2006). LNIG: Nueva estación sísmica digital en el noreste de México. *Ingenierías* , 9 (32), 17-24.

Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE* , 3 (1), 32-42.

Murillo Sánchez, E. (2002). *Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la subcuenca 24Bf "Monterrey", aplicando un sistema de información geográfica*. Monterrey, Nuevo León: M.Sc. Thesis, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 33 (2), 481-486.

Nelson, G. C., & Hellerstein, D. (1997). Do roads cause deforestation? Using satellite images in econometric analysis of land use. *American Journal of Agricultural Economics* , 79 (1), 80-88.

Niculită, M., Mărgărint, M. C., & Santangelo, M. (2016). Archaeological evidence for Holocene landslide activity in the Eastern Carpathian lowland. *Quaternary International* , 415, 175-189.

Otukey, J. R., & Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* , 12, S27-S31.

Padilla y Sánchez, R. (1982). *Geologic evolution of the Sierra Madre Oriental between Linares, Concepción del Oro, Saltillo, and Monterrey, Mexico*. Austin: Tesis Doctoral, University of Texas.

Penck, A. (1984). Morphologie der erdoberfläche. *Englehorn* , 214.

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution* , 20 (9), 503-510.

Potić, I. M., Ćurčić, N. B., Potić, M. M., Radovanović, M. M., & Tretiakova, T. N. (2017). Remote sensing role in environmental stress analysis: East Serbia wildfires case study (2007-2017). *Journal of the Geographical Institute 'Jovan Cvijic' SASA* , 67 (3), 249–264.

Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., Aghda, S. F., Gokceoglu, C., & Pradhan, B. (2014). GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences* , 7 (5), 1857-1878.

Ramírez Serrato, N. L., Yépez-Rincón, F. D., & Ferriño Fierro, A. L. (2019). Topographic Connection Method for Automated Mapping of Landslide Inventories, Study Case: Semi Urban Sub-Basin From Monterrey, Northeast of México. *Geocarto International* , 1-15.

Ramos-Zúñiga, L. G., Medina-Ferrusquía, H. C., & Montalvo-Arrieta, J. C. (2012). Patrones de sismicidad en la curvatura de Monterrey, noreste de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas* , 29 (3), 572-589.

Rathje, E. M., & Franke, K. (2016). Remote sensing for geotechnical earthquake reconnaissance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 91, 304-316.

Robison, R. (2008). Google: A Chronology of Innovations, Acquisitions, and Growth. *Journal of Library Administration* , 46 (3-4), 5-29.

Rodriguez, M., Valero, A., Navarro, I., & Bermúdez., J. E. (consultado en 2018). *Riesgos Naturales en el Municipio de San Pedro Garza García, N. L. México: Tipos, Características y Factores condicionantes*. Monterrey: Universidad Autonoma de Nuevo León.

Saha, A., Gupta, R., & Arora, M. (2002). Gis-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *International journal of remote sensing* , 23 (2), 357-369.

Salvador, A. (1991). *The Gulf of Mexico Basin, The Geology of North America*. Colorado: Geological Society of America.

Sappington, J. M., Longshore, K., & Thomson, D. (2007). Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat Anaysis: A case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management* , 71 (5), 1419 -1426.

Scheidegger, A. (1994). Hazards: singularities in geomorphic systems. *Geomorphology* , 19–25.

Schuster, C., Förster, M., & Kleinschmit, B. (2012). Testing the red edge channel for improving land-use classifications based on high-resolution multi-spectral satellite data. *International Journal of Remote Sensing* , 33 (17), 5583-5599.

SIATL. (2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica escala 1:50,000*. México: INEGI.

Skakun, S., Franch, B., Vermote, E., Roger, J. C., Becker-Reshef, I., Justice, C., y otros. (2017). Early season large-area winter crop mapping using MODIS NDVI data, growing degree days information and a Gaussian mixture model. *Remote Sensing of Environment* , 195, 244-258.

Smith, C. (1981). Review of the geologic setting, stratigraphy, and facies distribution of the Lower. *West Texas Geological Society Publication* , 1-27.

Smith, R. (1987). *Provenance and depositional environments of La Casita Formation, Sierra Madre Oriental, southwest of Monterrey, northeastern Mexico*. Nueva Orleans, Louisiana: University of New Orleans, tesis de maestría.

Smits, P. C., Dellepiane, S. G., & Schowengerdt, R. A. (1999). Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach. *International journal of remote sensing* , 20 (8), 1461-1486.

Steger, S., Brenning, A., Bell, R., & Glade, T. (2017). The influence of systematically incomplete shallow landslide inventories on statistical susceptibility models and suggestions for improvements. *Landslides* , 1-15.

Stone, S. (1975). *The Jurassic of the Gulf Coast: Houston, Texas*. Houston: Exxon Production Research Company.

Stoter, J. E. (2000). Needs, Possibilities and Constraints to Develop a 3D Cadastral Registration System. *Proceedings of 22nd Urban and Regional Data Management Symposium* (págs. 43-58). Delft, The Netherlands: Urban Data Management Society.

Stoter, J., & Gorte, B. (2003). Height in the Cadastre: Integrating Point Heights and Parcel Boundaries. *Proceedings of FIG Working Week 2003*, (págs. 13-17). Paris, Francia.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union* , 38 (6), 913-920.

Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography* , 48 (1-2), 547-556.

Talwani, P. (1999). Fault geometry and earthquakes in continental interiors. *Tectonophysics* , 305 (1-3), 371-379.

Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes* , 81–100.

Terzaghi, K. (1950). Mechanisms of landslides. *Geological Society of America* , 83-123.

Todd, R. G., & Mitchum Jr, R. M. (1977). Part 8. Identification of Upper Triassic, Jurassic, and Lower Cretaceous Seismic Sequences in Gulf of Mexico and Offshore West Africa. En *Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration* (págs. 145-163). Tulsa, OK: AAPG Memoir 26.

Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* , 8, 127-150.

Twiss, R. J., & Moore, E. M. (1992). Normal faults. *Structural Geology* , 74-95.

Unikel, L., Ruiz, C. G., & Garza, V. G. (1978). *El desarrollo urbano de México: Diagnóstico e implicaciones futuras* (2da. Edición ed.). México: El Colegio de México.

Van Westen, C. J. (2013). *Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. Treatise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press.

Van Westen, C. J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics* , 21 (2-3), 241-255.

Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering geology and the Environment* , 62 (5), 167-184.

Varade, D., Sure, A., & Dikshit, O. (2018). Potential of Landsat-8 and Sentinel-2A Composite for Land Use Land Cover Analysis. *Geocarto International* , 1-32.

Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice* (Vol. 3). Paris, France : UNESCO.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. En *LANDSLIDES: ANALYSIS AND CONTROL* (págs. 11-33). Washington, DC, United States: Transportation Research Board.

Wang, R., Peethambaran, J., & Chen, D. (2018). LIDAR Point Clouds to 3-D Urban Models: A Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* , 11 (2), 606-627.

Wang, Z. (2004). RS+GCPs select basic information of landslide. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control* , 15 (1), 94-101.

Weidie, A., Wolleben, J., & McBride, E. (1972). Late Cretaceous depositional systems in northeastern, Mexico. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions* , 22, 323-329.

Wills, C. J., & McCrink, T. P. (2002). Comparing landslide inventories: The map depends on the method. *Environmental & Engineering Geoscience* , 8 (4), 279-293.

Wilson, J. (1990). Basement Structural Controls on Mexico Carbonate Facies in Northeastern Mexico-A Review. *Special Publications, International Association of Sedimentologists* , 9, 235-255.

Wilson, J. (1975). *Carbonate Facies in geologic history*. New York, U.S.A.: Ed. Springer-Verlag.

Wilson, J. L. (2012). *Carbonate facies in geologic history*. Texas: Springer Science & Business Media.

Xu, C., Xu, X., Dai, F., Xiao, J., Tan, X., & Yuan, R. (2012). Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science* , 23, 97-120.

Yépez, R. F., & Lozano, G. D. (2017). Synergetic efficiency of LIDAR and WorldView-2 for 3D urban cartography in Northeast Mexico. *Geocarto International* , 34 (2), 164-178.

Yuan, F., Sawaya, K. E., Loeffelholz, B. C., & Bauer, M. E. (2005). Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote sensing of Environment* , 98, 2-3.

Zasadni, J., & Kłapyta, P. (2014). The Tatra Mountains during the last glacial maximum. *Journal of Maps* , 10 (3), 440-456.

Zhang, Z. Q., Gong, H. L., Zhao, W. J., & Zhang, Y. Q. (2005). Application of remote sensing to study of landslide. *IGARSS 2005: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (págs. 1546-1549). NEW YORK: IEEE.















































Zhu, Z., Wang, S., & Woodcock, C. E. (2015). Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment* , 159, 269-277.

Zwanzinger, J. A. (1979). Provincias Mesozoicas Productoras en el Noreste de México. *Ingeniería Petrolera* , 19 (3), 35-40.

7 ANEXOS

Anexo 1. Simbología completa del mapa de uso de suelo presentado en la Figura 3, el cual, está basado en los datos de la serie V propuestos por INEGI.

ACUÍCOLA	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	MATORRAL ESPINOSO TAMALIPECO
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL	AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE	MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y PERMANENTE	AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE	MATORRAL SARCO-CRASICAULE
AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y SEMIPERMANENTE	AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE	MATORRAL SARCO-CRASICAULE DE NEBLINA
AGRICULTURA DE HUMEDAD PERMANENTE	AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	MATORRAL SARCOCAULE
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE	ASENTAMIENTOS HUMANOS	MATORRAL SUBMONTANO
AGRICULTURA DE HUMEDAD SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	BOSQUE CULTIVADO	MATORRAL SUBTROPICAL
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	BOSQUE DE AYARÍN	MEZQUITAL TROPICAL
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	BOSQUE DE CEDRO	MEZQUITAL XERÓFILO
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	BOSQUE DE ENCINO	PALMAR INDUCIDO
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE	BOSQUE DE ENCINO-PINO	PALMAR NATURAL
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE	BOSQUE DE GALERÍA	PASTIZAL CULTIVADO
AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE	BOSQUE DE MEZQUITE	PASTIZAL GIPSÓFILO
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	BOSQUE DE OYAMEL	PASTIZAL HALÓFILO
	BOSQUE DE PINO	PASTIZAL INDUCIDO
	BOSQUE DE PINO-ENCINO	PASTIZAL NATURAL
	BOSQUE DE TÁSCATE	PAÍS EXTRANJERO
	BOSQUE INDUCIDO	POPAL
	BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	PRADERA DE ALTA MONTAÑA
	CHAPARRAL	SABANA
	CUERPO DE AGUA	SABANOIDE
	DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	SELVA ALTA PERENNIFOLIA
	MANGLAR	SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA
	MATORRAL CRASICAULE	SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	MATORRAL DESÉRTICO MICROFILO	SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA
	MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA
		SELVA BAJA PERENNIFOLIA
		SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA

	SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE GALERÍA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO- CRASICAULE
	SELVA DE GALERÍA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE MEZQUITE		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCO- CRASICAULE DE NEBLIA*
	SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SARCOCAULE
	SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO- ENCINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBMONTANO
	SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE TASCATE		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL SUBTROPICAL
	SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL TROPICAL
	SIN VEGETACIÓN APARENTE		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE CHAPARRAL		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MEZQUITAL XERÓFILO
	TULAR		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MANGLAR		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PALMAR NATURAL
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL GIPSÓFILO
	VEGETACIÓN DE DESIERTOS ARENOSOS		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL HALÓFILO
	VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE PASTIZAL NATURAL
	VEGETACIÓN DE GALERÍA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN DE PETÉN		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN GIPSÓFILO				
	VEGETACIÓN HALÓFILO HIDRÓFILO				
	VEGETACIÓN HALÓFILO XERÓFILO				
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE AYARÍN				
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE CEDRO				
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO				
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO				

	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE AYARÍN		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE CEDRO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO- PINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA PERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE GALERÍA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE MEZQUITE		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE OYAMEL		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA DE GALERÍA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE DESiertos ARENOSOS		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO- ENCINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN DE GALERÍA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE TÁSCATE		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE VEGETACIÓN HALÓFILA HIDRÓFILA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE VEGETACIÓN DE PETÉN
			VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE MANGLAR		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO
			VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE PALMAR NATURAL		
			VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA		

	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO- CRASICAULE DE NEBLINA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE PASTIZAL NATURAL
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE PINO- ENCINO		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA PERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE TASCATE		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MANGLAR		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL CRASICAULE		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DE CONIFERAS		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA CADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO MICRÓFILO		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO		VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE VEGETACIÓN HALÓFILA XERÓFILO
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL ROSETÓFILO COSTERO		ZONA URBANA
	VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE MATORRAL SARCO- CRASICAULE		